



**UNIVERSIDAD LIBRE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
INGENIERÍA MECÁNICA  
PROYECTO DE GRADO**



Autor Del Proyecto: Gerardo Castellanos Bautista  
Código: 065131031  
Cédula: 1.015.460.540  
Teléfono de Contacto: 3214560038  
Correo Electrónico: gerardo.castellanosb@unilibrebog.edu.co

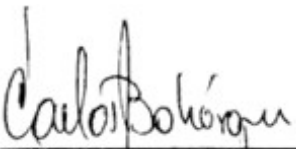


Autor Del Proyecto: Juan Carlos Camacho Bautista  
Código: 065131002  
Cédula: 1.014.227.961  
Teléfono de Contacto: 3012344120  
Correo Electrónico: juanc.camachob@unilibrebog.edu.co



**SIMULACIÓN Y VERIFICACIÓN EXPERIMENTAL DEL DIAGRAMA ESFUERZO-  
DEFORMACIÓN A PARTIR DE LA MICROSTRUCTURA DE UN ACERO DOBLE FASE  
SAE1045 TRATADO TÉRMICAMENTE**

Director: Carlos Arturo Bohorquez Avila  
Profesión: Ingeniero Mecánico  
Correo Electrónico: carlosa.bohorqueza@unilibrebog.edu.co

  
CARLOS ARTURO BOHORQUEZ AVILA



SIMULACIÓN Y VERIFICACIÓN EXPERIMENTAL DEL DIAGRAMA ESFUERZO-  
DEFORMACIÓN A PARTIR DE LA MICROSTRUCTURA DE UN ACERO DOBLE  
FASE SAE1045 TRATADO TÉRMICAMENTE

JUAN CARLOS CAMACHO BAUTISTA  
GERARDO CASTELLANOS BAUTISTA

UNIVERSIDAD LIBRE SEDE  
BOSQUE POPULAR  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
INGENIERÍA MECÁNICA  
BOGOTÁ D.C.  
2018



SIMULACIÓN Y VERIFICACIÓN EXPERIMENTAL DEL DIAGRAMA ESFUERZO-  
DEFORMACIÓN A PARTIR DE LA MICROSTRUCTURA DE UN ACERO DOBLE  
FASE SAE1045 TRATADO TÉRMICAMENTE

JUAN CARLOS CAMACHO BAUTISTA  
GERARDO CASTELLANOS BAUTISTA

Ing. CARLOS ARTURO BOHÓRQUEZ ÁVILA

UNIVERSIDAD LIBRE SEDE  
BOSQUE POPULAR  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
INGENIERÍA MECÁNICA  
BOGOTÁ D.C.  
2018



## TABLA DE CONTENIDO

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>7</b>
<b>2. DESCRIPCIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA .....</b>	<b>7</b>
<b>3. JUSTIFICACIÓN.....</b>	<b>8</b>
<b>4. OBJETIVOS.....</b>	<b>9</b>
4.1.    Objetivo General.....	9
4.2.    Objetivos Específicos.....	9
<b>5. MARCO REFERENCIAL .....</b>	<b>9</b>
5.1.    Marco Teórico.....	9
5.1.1.    Volumen elemental representativo por sus siglas en inglés (RVE): .....	9
5.1.2.    Modelamiento micromecánico: .....	10
5.1.3.    Modelamiento bilineal:.....	10
5.1.4.    Ley de Hooke: .....	11
5.1.5.    Ensayo de tensión: .....	11
5.1.6.    Propiedades mecánicas:.....	12
5.2.    Marco Conceptual.....	13
5.3.    Estado del Arte .....	14
5.4.    Marco legal y normativo .....	21
<b>6. DISEÑO METODOLÓGICO.....</b>	<b>21</b>
6.1.    Tratamiento térmico al acero SAE 1045.....	21
6.2.    Toma de micrografía .....	23
6.3.    Elección del volumen elemental representativo .....	23
6.4.    Binarización de imagen microestructural (micrografía) .....	23
6.5.    Asignación de propiedades a los microconstituyentes.....	24
6.6.    Simulación de cargas.....	24
6.7.    Modelamiento del diagrama esfuerzo deformacion .....	25
6.8.    Ensayo de tracción. ....	25
6.9.    Comparación de la gráfica esfuerzo-deformacion entre el modelo bilineal simulado y el modelo experimental .....	25
6.10.    Diagrama de flujo metodológico .....	26
<b>7. DESARROLLO DEL CÓDIGO .....</b>	<b>27</b>
7.1.    Programación Matlab®.....	27
7.2.    Programación ANSYS®.....	28
<b>8. RESULTADOS.....</b>	<b>29</b>
8.1.    Resultados experimentales .....	29
8.1.1.    Resultados microestructurales del tratamiento térmico y toma de la micrografía. ....	29
8.1.2.    Ensayo de tensión .....	30
8.2.    Resultados de análisis de imagen .....	32
8.2.1.    Elección del volumen elemental representativo. ....	32
8.2.2.    Binarización de las imágenes RVE.....	33
8.2.3.    Porcentaje de fases.....	35



8.3.	Resultados de la simulación .....	36
8.3.1.	Resultados RVE .....	37
8.3.2.	Resultados promedio de las simulaciones .....	42
9.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	44
9.1.	Análisis de resultados experimentales .....	44
9.2.	Análisis de resultados de procesamiento de imagen .....	45
9.3.	Análisis de resultados de la simulación de cargas. ....	45
10.	CONCLUSIONES.....	48
11.	RECOMENDACIONES .....	49
	REFERENCIAS.....	50
	ANEXOS .....	52
	Anexo A: certificado de composición química del acero.....	52
	Anexo B: Código de Matlab .....	53
	Anexo C: Código de Ansys .....	54

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Evolución de la aplicación de los aceros doble fase en los automóviles de General Motors [3].	8
Figura 2. Selección del elemento representativo [6].	10
Figura 3. Tipos de gráficos esfuerzo-deformación. [7]	11
Figura 4. Cuerpo de forma cubica sometido a tensión [11].	12
Figura 5. Diagrama esfuerzo-deformación, del modelo teórico y el experimental [15].	18
Figura 6. Representación de las zonas y temperaturas de tratamiento [20].	22
Figura 7. Secuencia de tiempos y temperaturas para el acero SAE1045.	23
Figura 8. Diagrama de flujo metodológico.	26
Figura 9. Micrografía del acero en estado de entrega.	29
Figura 10. Micrografía acero tratado térmicamente.	30
Figura 11. Gráfica esfuerzo deformación del material en estado de entrega x800 aumentos.	31
Figura 12. Gráfica esfuerzo deformación material tratado térmicamente x800 aumentos.	31
Figura 13. Elección de los RVE's.	32
Figura 14. Variación del umbral sobre los diferentes RVE.	33
Figura 15. Binarización RVE #1.	34
Figura 16. Binarización REV #2.	34
Figura 17. Binarización REV #3.	34
Figura 18. Micrografía RVE #1	35
Figura 19. Micrografía RVE #2.	35
Figura 20. Micrografía RVE #3.	35
Figura 21. Restricciones y fuerzas usadas en la simulación.	36
Figura 22. Esfuerzo de Von Mises RVE #1.	37
Figura 23. Esfuerzo de Von Mises RVE #2.	37
Figura 24. Esfuerzo de Von Mises RVE #3.	38
Figura 25. Gráfica sin ajustar escala y gráfica con escala ajustada de RVE #1. ...	39
Figura 26. Gráfica sin ajustar escala y gráfica con escala ajustada de RVE #2. ...	40
Figura 27. Gráfica sin ajustar escala y gráfica con escala ajustada de RVE #3. ...	41
Figura 28. Gráfica comparativa de las gráficas esfuerzo vs deformación de los RVE's	42
Figura 29. Gráfica con el promedio de las tres graficas esfuerzo vs deformación.	43
Figura 30. Gráfica comparativa entre el acero SAE 1045 tratado térmicamente y normalizado.	44
Figura 31. Comparación entre la curva simulada y la real	46
Figura 32. Deformación plástica infinita en la simulación.	47



## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Nanoindentación en granos de ferrita en los especímenes DP10, DP20 y DP60 [13]. .....	16
Tabla 2. Composición química SAE1045.....	21
Tabla 3. Propiedades mecánicas de las fases [15].....	24
Tabla 4. Códigos relevantes en la programación de la simulación. ....	28
Tabla 5. Desviación estándar de los porcentajes de las fases en las selecciones RVE. ....	45
Tabla 6. Variación del umbral en el REV #2 .....	45

## 1. INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años se ha incrementado el uso de los aceros doble fase en la industria automotriz debido a su buena relación resistencia contra peso, razón por la cual se ha ido incluyendo gradualmente en la construcción de las carrocerías de los automotores. Estos aceros se caracterizan por la presencia de dos fases en su microestructura las cuales pueden ser: Ferrita y Martensita, estas fases se forman luego de tratar el acero térmicamente a temperaturas intercríticas donde se encuentra la austenita más ferrita que al enfriarse rápidamente, facilita la formación de martensita y ferrita.

La inclusión de estos aceros en la industria genera la necesidad de nuevas técnicas para la determinación de sus propiedades mecánicas ya que el método convencional para generar la curva esfuerzo-deformación de un acero requiere la práctica de un ensayo destructivo, que requiere el sacrificio de una probeta del acero a estudiar. A partir de esta problemática surge la posibilidad de remplazar este procedimiento físico por un modelamiento matemático que permita predecir la curva esfuerzo vs deformación de un acero doble fase basado en su microestructura sin tener que fracturar el material.

## 2. DESCRIPCIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

La caracterización de las propiedades mecánicas de los materiales, principalmente la de los aceros, se ha llevado a cabo por medio de ensayos destructivos basados en normas internacionales que describen el procedimiento adecuado para la realización de los mismos, dichos ensayos tienen como finalidad describir el comportamiento del material cuando es sometido a cargas externas, lo que hace que varias probetas sean sacrificadas para obtener las características mecánicas del material.

En la actualidad se han implementado mecanismos de modelamiento en diferentes áreas de la ingeniería lo que abre la posibilidad al desarrollo de un modelo matemático que pueda determinar las características mecánicas del material basado en su microestructura, los aceros doble fase presentan una característica importante para este tipo de modelamiento debido al número de fases presentes en su microestructura, esto reduce la complejidad en la identificación y asignación de propiedades microestructurales a las fases.

Teniendo en cuenta que se puede reemplazar el método físico por un análisis con elementos finitos (modelamiento micromecánico) surge la posibilidad de *obtener la*



*gráfica esfuerzo deformación de un acero doble fase a partir de su microestructura sin la necesidad de practicar un ensayo destructivo.*

### 3. JUSTIFICACIÓN

En la actualidad la industria metal-mecánica busca impulsar el desarrollo de aceros que tengan buena relación resistencia-peso [Figura 1]. Los aceros doble fase de baja aleación forman parte de los Aceros de Avanzados de Alta resistencia por sus siglas en inglés AHSS (Advanced High Strength Steel) los cuales se destacan por su excelente conformabilidad, además que pueden alcanzar esfuerzos de tensión desde 600 MPa hasta 1200 MPa[1], por lo tanto, los proveedores que desarrollan aceros de doble fase están interesados en predecir la relación entre las microestructuras y las propiedades para optimizar el diseño microestructural [2].

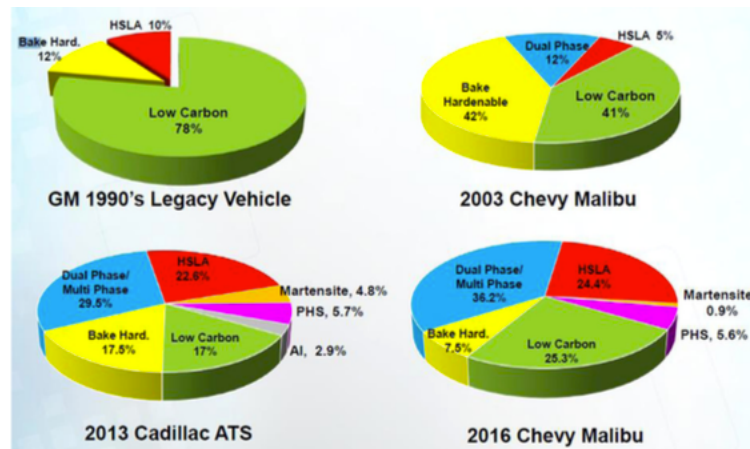


Figura 1. Evolución de la aplicación de los aceros doble fase en los automóviles de General Motors [3].

Con el tiempo se ha presentado un avance en el conocimiento de la microestructura del acero, que muestra que su respuesta macroscópica está fuertemente influida por las interacciones entre las diversas fases que constituyen su microestructura, este avance ha ido de la mano con los modelamientos del comportamiento mecánico de los micro constituyentes de los aceros doble fase[4].

El modelado computacional micro mecánico es imprescindible para guiar el diseño de materiales de aceros doble fase con mejoras simultáneas en la resistencia y ductilidad [5]. Este tipo de simulaciones se enfoca en el análisis por elementos finitos del comportamiento mecánico de los micro constituyentes de un acero, este método es útil ya que permite evaluar distintas combinaciones de fase y tamaño de grano, a su vez presenta una ventaja respecto al tiempo en el cual se pueden



obtener las características mecánicas del acero en comparación al tiempo usado en el ensayo de tensión con el fin de conocer las propiedades mecánicas obtenidas en la curva esfuerzo deformación [5].

## **4. OBJETIVOS**

### **4.1. Objetivo General**

Simular y verificar experimentalmente el diagrama esfuerzo-deformación a partir de la microestructura de un acero doble fase SAE 1045 tratado térmicamente.

### **4.2. Objetivos Específicos**

- Establecer la secuencia de tiempos y temperaturas para la obtención de un acero doble fase y la identificación de las microestructuras y micrografías.
- Definir el porcentaje de ferrita y martensita presente en la microestructura para asignar las propiedades mecánicas de cada fase basado en la micrografía binarizada.
- Desarrollar la programación en ANSYS APDL para llevar acabo el modelamiento micro mecánico con el fin de comparar la gráfica esfuerzo-deformación obtenida por este método, con otra obtenida por los métodos tradicionales (Ensayo de tracción), para determinar la desviación que hay entre ellas.

## **5. MARCO REFERENCIAL**

### **5.1. Marco Teórico**

#### **5.1.1. Volumen elemental representativo por sus siglas en inglés (RVE):**

Esta teoría parte de una suposición en la cual se puede asumir que el comportamiento de una determinada celda representativa del material posee las mismas propiedades que sus celdas vecinas lo que implica un comportamiento periódico y continuo que en el micro modelamiento se puede considerar como un equivalente homogéneo que describe efectivamente el comportamiento micro mecánico del material.

Las principales ventajas que presenta esta metodología es que reduce la complejidad de un modelo 3D, ya que se modela un plano de esfuerzos, esto permite también que se minimice el costo computacional [6].

La selección del elemento representativo se debe hacer teniendo en cuenta que la celda seleccionada debe tener un comportamiento periódico a lo largo del arreglo que se desea modelar como se muestra en la Fig. 2.

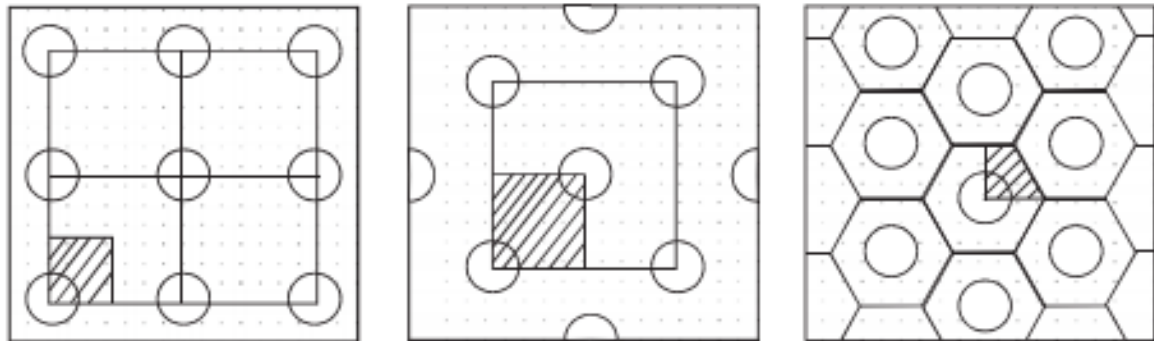


Figura 2. Selección del elemento representativo [6].

### 5.1.2. Modelamiento micromecánico:

El modelamiento micro mecánico está basado en la micrografía de un acero, la cual puede representar la deformación a escala macroscópica de un sólido heterogéneo, por lo cual la microestructura debe tener las características más relevantes del material a simular. Se debe conocer las propiedades mecánicas de cada constituyente contenido en el material y las interacciones entre ellos, por último se lleva a cabo un proceso de homogenización para que la respuesta microscópica sea parecida a la respuesta macroscópica [6].

### 5.1.3. Modelamiento bilineal:

Modelamiento bilineal: En el modelamiento micro mecánico de un material comúnmente se aplica el estudio estático lineal donde los desplazamientos son únicamente elásticos [7] lo que hace que el estudio por elementos finitos solo se tenga en cuenta el comportamiento basado en la ley de Hooke pero de igual forma se puede simular mediante una ecuación diferencial el comportamiento plástico del material lo que quiere decir que los microconstituyentes o fases presentes en el material se pueden simular usando dos ecuaciones que describen el comportamiento elástico-plástico del modelo. La [Figura 3. d.] hace referencia a un material con elasticidad ideal y de igual forma un comportamiento plástico rígido ideal. La principal razón por la cual el modelamiento micro mecánico de un acero no puede llevarse a cabo con un modelamiento lineal es por que la curva de esfuerzo-deformación presenta dos zonas y un modelo lineal no puede asimilar este comportamiento; en cambio si se presenta un modelo bilineal para representar la curva esfuerzo-deformación este análisis permite definir y aproximar el comportamiento del material cuando es sometido a cargas basando el análisis en la ley de Hooke y teoría de plasticidad.

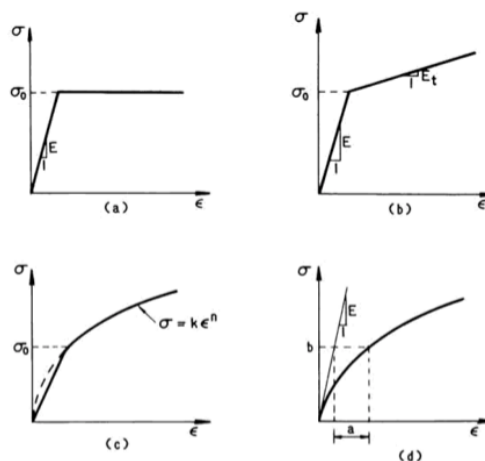


Figura 3. Tipos de gráficos esfuerzo-deformación. [7]

#### 5.1.4. Ley de Hooke:

Es usada para representar la zona elástica de un acero en el diagrama esfuerzo-deformación. La primera parte del diagrama, representada por una línea recta, permite ver que, inicialmente hay proporcionalidad entre tensiones y deformaciones [8], cumpliendo con:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (1)$$

El coeficiente  $E$  se denomina módulo de elasticidad o módulo de Young, como la deformación  $\varepsilon$  es una cantidad adimensional, el módulo  $E$  se expresa en las mismas unidades del esfuerzo [9]. Esta ley se cumple hasta que la tensión alcanza el límite de proporcionalidad.

#### 5.1.5. Ensayo de tensión:

Como se mencionó anteriormente el ensayo de tensión es una prueba que permite obtener la gráfica de esfuerzo contra deformación de un material; además de esto es un proceso estandarizado bajo la norma ASTM E8.

Esta prueba consiste en someter un material a cargas axiales con el fin de determinar: su deformación, el comportamiento elástico y plástico, módulo de elasticidad entre otros datos del material que son obtenidos con la curva esfuerzo deformación. Antes de someter el espécimen a una carga externa se realiza una marca sobre el material que determina la longitud base, luego se aplica una carga que hace que la longitud inicial aumente y se calcula el valor de la deformación unitaria dividiendo la diferencia de alargamiento sobre la distancia base para una carga determinada; con el área de sección transversal y la carga a la que es sometido el espécimen se calcula el esfuerzo de esta manera se obtiene el

gráfico de esfuerzo – deformación en el cual se ubica la deformación en el eje x y el esfuerzo en el eje y [9].

La gráfica esfuerzo – deformación puede variar sobre el mismo material debido a que variables como temperatura, velocidad de aplicación de cargas, procedimiento, obtención de datos, etc. No son debidamente controladas en el ensayo de tensión.

#### 5.1.6. Propiedades mecánicas:

Los materiales presentan determinadas propiedades mecánicas que resultan de la aplicación de fuerzas externas sobre ellos, las más importantes son: resistencia, dureza, ductilidad y rigidez. La interacción de los esfuerzos con la deformación del material es relacionable en un diagrama, la deformación es la respuesta que tiene el material ante la aplicación de fuerzas mecánicas por unidad de área [10]. La aplicación de cargas uniaxiales sobre un elemento produce una variación longitudinal, así como transversal (Figura 4) la cual es representada por el módulo de Poisson.

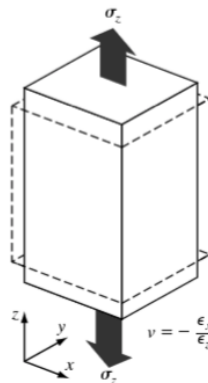


Figura 4. Cuerpo de forma cubica sometido a tensión [11].

Existen dos zonas de comportamiento ante las cargas, la zona elástica indica la capacidad de recuperación que posee un material al ser sometido a determinadas fuerzas, la zona plástica comienza cuando se sobrepasa el límite elástico del material a partir de este punto la deformación es permanente, estas zonas pueden variar en proporción a la composición del material.

Para el modelamiento micro mecánico hay que tener en cuenta que, la deformación elástica tiene su origen microscópico en las fuerzas que aparecen en los nudos de la red al quererlos separar o unir respecto a sus posiciones de equilibrio [10]. Ya que la deformación elástica depende en gran medida del esfuerzo aplicado es importante tener claro estos conceptos para la simulación por elementos finitos para la determinación de las propiedades mecánicas del acero doble fase.

## 5.2. Marco Conceptual

### Diagrama esfuerzo deformación:

Uno de los criterios que aplica para el diseño y caracterización de los materiales de ingeniería es el estudio de la deformación causada cuando el elemento está sometido a una carga externa. Al momento de analizar el material cuando se le aplica una carga este se deforma con respecto a su longitud inicial y a esta diferencia de longitudes se le llama deformación; en cuanto al esfuerzo es la carga que se ejerce sobre un área determinada en el material generando así una deformación.

La forma del material determina la deformación y el esfuerzo debido a que estos parámetros depende de la longitud y el área respectivamente y representan características de acuerdo a la forma del material lo que quiere decir que si se evalúa la curva esfuerzo-deformación para un material específico con una dimensiones determinadas esta curva no representaría el comportamiento del mismo material con otras dimensiones por esta razón se introduce el termino deformación unitaria que relaciona la diferencia de longitudes (deformación) con respecto a la longitud base; esta deformación unitaria y el esfuerzo ejercido en un material no depende de la forma; de esta manera se obtiene un grafica de esfuerzo deformación representativa para el material sin importar la forma [9].

Para la construcción de la curva esfuerzo deformación se tiene un espécimen del material con dimensiones determinadas por la norma ASTM E8, esta probeta es montada en una máquina de ensayo mecánicos que proporciona una carga axial e incremental sobre el material con el fin de generar una deformación la cual es medida y comparada con una longitud base marcada en la probeta. Estos datos de deformación y esfuerzo son graficados para obtener el comportamiento del material hasta el momento de fractura.

Con esta información se pueden resolver los análisis que son indeterminados desde un punto de vista de la estática y los datos aportan información que ayuda a determinar propiedades específicas del material tales como módulo de elasticidad, parámetros de deformación plástica y deformación elástica entre otros.

Las gráficas esfuerzo - deformación muestran dos grandes tipos de materiales clasificados según la forma de la gráfica el primer grupo se refiere a los materiales dúctiles que se caracterizan por su capacidad de fluir a temperatura ambiente y presentan una reducción de diámetro en la probeta antes de la fractura y el segundo grupo son los materiales frágiles que no presentan una reducción de área antes de la rotura como es el caso del hierro colado o el vidrio.

En este punto vale la pena aclarar que la gráfica esfuerzo deformación puede tomar dos valores de esfuerzo uno ingenieril y otro real.

### **Acero doble fase**

Es un acero que es sometido a un tratamiento térmico para obtener dos fases en su microestructura y que están compuestas por una matriz de ferrita con islas de martensita, los aceros de doble fase fueron la primera familia de aceros laminados para automóviles de alta resistencia, cuya fabricación implicó transformaciones de fase específicas. Con un alto equilibrio de resistencia y ductilidad (formabilidad), tienen una resistencia a la tracción de 450 a 1200 MPa [3].

### **Análisis de imagen**

Hace referencia a la extracción de información proveniente del procesamiento de una representación visual (micrografía), procedimiento que será implementado en este trabajo para obtener la curva esfuerzo deformación a partir de la micrografía de un acero doble fase.

### **Coefficiente de Poisson**

Constante basada en la relación que representa la deformación transversal sobre la deformación longitudinal en los materiales bajo una carga axial como se puede observar en la ecuación 2. Esta relación supone que todos los materiales son considerados como homogéneos e isotrópicos, es decir, se supondrá que sus propiedades mecánicas son independientes tanto de la posición como de la dirección. Esto significa que la deformación unitaria debe tener el mismo valor para cualquier dirección transversal [9].

$$\nu = - \frac{\text{deformación unitaria lateral}}{\text{deformación unitaria axial}} \quad (2)$$

### **5.3. Estado del Arte**

- En 2016 se realizó una investigación por (AMIRMALEKI M.; SAMEI J.; GREENA D.E.; VAN RIEMSDIJK I.; STEWART L.) titulada: “ 3D mechanical modeling of dual phase steels using the representative volume element method”, en este documento se desarrolla un modelado en tres dimensiones de la microestructura de dos aceros doble fase: el DP500 y el DP600 con el fin de predecir el comportamiento de la curva esfuerzo-deformación, cuando estos materiales son sometidos a una carga uniaxial.



Para llevar a cabo este modelamiento micro mecánico los autores eligen el método del volumen elemental representativo, para la selección de la imagen micro estructural que será analizada, teniendo en cuenta que un RVE (Volumen Elemental Representativo) es un pequeño volumen de microestructura que tiene las características generales de la misma como la fracción volumétrica, la morfología y la aleatoriedad de las fases [2], haciendo posible realizar un modelado de las características específicas. En el desarrollo de esta investigación se discrimina este procedimiento en cuatro pasos: definición del RVE, definición del comportamiento de flujo de cada fase, aplicación de las condiciones de limite y la simulación de la deformación y por ultimo homogenización. *Definición del RVE:* En la investigación se toma un modelo ideal donde la microestructura esta compuesta por una matriz de ferrita que posee inclusiones de martensita. *Definición del comportamiento de flujo de cada fase:* para determinar el comportamiento de flujo de los micro constituyentes los autores desarrollaron un modelo basado en la dislocación. *Aplicación de las condiciones de limite:* en esta investigación se utilizaron tres tipos de condiciones de contorno RVE: Desplazamientos prescritos, fuerzas prescritas y periodicidad prescrita. *Homogenización:* por ultimo los autores suponen que el material es homogéneo a escala macro pero heterogéneo en la micro escala debido a la existencia de inclusiones, granos, interfaces, cavidades, etc. Pero esta falta de homogeneidad al ser periódica en toda la microestructura, permite modelar los efectos de una distribución no uniforme de la microestructura sobre la respuesta macroscópica [2] por lo anterior la metodología que será utilizada para llevar a cabo el modelamiento micro mecánico basa en los cuatro pasos para la simulación de cargas.

- En el trabajo titulado “Characterizing DP-steels using micromechanical modeling of cells” realizada por (AL-ABBASI, F.M.; NEMES J.A.) en el 2007, se lleva a cabo un modelamiento micro mecánico de celdas a un acero doble fase con el fin de caracterizarlo, en el modelo se tienen en cuenta consideraciones que pueden tener una influencia significativa en el comportamiento del acero, estos incluyen: el tamaño de grano de ferrita, el ablandamiento de martensita por dilución de carbono y los efectos de distribución de tamaño de partícula[6]. *Las conclusiones* en este trabajo son: la diferencia en la resistencia del material debido al tamaño de grano de ferrita no es significativa debido a que los especímenes ensayados no presentaban mayor variación entre ellos. *ablandamiento de martensita por dilución de carbono:* los autores tomaron en cuenta este parámetro para modelar el comportamiento plástico de la martensita y encontraron que es de gran importancia a pesar de que la deformación en la martensita es cuantitativamente pequeña, el ablandamiento de la martensita se produce cuando su volumen se incrementa pero manteniendo el contenido de carbono constante transformando su estructura cristalina de FCC a BCT,



cuando esto ocurre la cantidad de carbono contenido dentro de la red de los átomos de hierro no es suficiente para producir el mismo efecto de fortalecimiento cuando tiene bajo volumen y esto hace que la fuerza de la martensita decline [12]. *Distribución del tamaño de la partícula:* en este trabajo se encontró que la distribución del tamaño de la partícula tiene un efecto directo con los mecanismos de deformación de los aceros doble fase. Los autores concluyeron luego de la comparación entre el modelado micro mecánico y los resultados experimentales, que el modelo tiene la capacidad de capturar el comportamiento mecánico de los aceros doble fase, puede capturar propiedades importantes como: propiedades mecánicas tales como el límite de elasticidad, alargamiento uniforme, esfuerzo último de fluencia y la velocidad de endurecimiento por deformación [12]. Por lo mencionado en el trabajo anterior el modelamiento micro mecánico se debe realizar en las microestructuras de los aceros con el fin de determinar las características mecánicas presentes en material, para ello es necesario conocer la influencia que tienen las propiedades de los micro constituyentes sobre el comportamiento a nivel macro del material.

- En el año 2016 se realizó una investigación por (EBRAHIMIAN A.; GHASEMI BANADKOUKI S.S.) y publicaron un artículo que lleva por nombre: “Effect of alloying element partitioning on ferrite hardening in a low”, en este documento se estudio el efecto del carbono y los elementos aleantes en el comportamiento de endurecimiento de un acero AISI 4340, para ello realizaron una serie de tratamientos térmicos para obtener la microestructura de un acero doble fase. Se obtuvo la nano dureza correspondiente a la ferrita para los especímenes DP tratados a 650 ° C durante 10, 20 y 60 minutos, simbolizados como DP10, DP20 y DP60, respectivamente [Figura 5][13]. Esta investigación aporta los valores de nano dureza de la ferrita fundamentales para el desarrollo de este proyecto debido a que se necesita definir las propiedades de las fases sobre la imagen digitalizada.

Tabla 1. Nanoindentación en granos de ferrita en los especímenes DP10, DP20 y DP60 [13].

Símbolo del espécimen	Nano dureza de la ferrita (HV5 mN)		
	A	B	C
DP10	329	350	429
DP20	328	345	388
DP60	319	342	368

- En el estudio realizado por (DE LA CONCEPCIÓN, V.L.; LORUSSO, H.N.; SVOBODA H.G.) en el 2015, titulado: “Effect of

carbon content on microstructure and mechanical properties of dual phase steels”, en el cual se estudia el efecto de fracciones de martensita y ferrita, contenido de carbono martensítico, tamaño de grano y resistencia de ambas fases en el comportamiento mecánico de aceros doble fase, en el desarrollo de este estudio investigaron la influencia del contenido de carbono sobre la microestructura, para ello trataron térmicamente probetas a diferentes temperaturas intercríticas obteniendo así aceros doble fase con diferentes fracciones de martensita.

Este proyecto concluyó que la mejor combinación de propiedades mecánicas en el acero doble fase analizado puede obtenerse con un contenido de carbono entre 0,1 y 0,15% y 50% de martensita [14]. De acuerdo a lo anterior el desarrollo micro estructural de los aceros conlleva al estudio de las características mecánicas presentes en la microestructura, el modelado computacional es una herramienta que puede ayudar con dicho desarrollo el proyecto contempla las características de las fases presentes en la microestructura ya que estas son el centro del análisis, y es necesario contemplar la variación de propiedades en la ferrita y martensita presentes en la microestructura esto da un nuevo concepto para la selección de un correcto Volumen Elemental Representativo (RVE) usado en la presente investigación.

- La obtención de la curva esfuerzo-deformación de un acero doble fase implica, en el trabajo llamado: “Microstructural modelling of dual phase Steel”, realizado por (SCHELLEKENS, M.A.J.H.J.), en el 2010, se realizó un modelo computacional para entender la relación entre las características micro estructurales y el comportamiento macroscópico de los aceros doble fase, llegando a la conclusión que la respuesta tensión-deformación global está influenciada principalmente por la fracción de volumen de martensita y difícilmente por la distribución de martensita. La investigación también demostró que para aumentar la resistencia del material se debe aumentar la fracción volumétrica de martensita, pero hay que tener precaución porque existe un equilibrio entre la resistencia y la ductilidad del material, ya que si se aumenta demasiado la fracción volumétrica se disminuye el espacio entre granos de martensita y esto conduce a la iniciación del daño antes de la deformación[15].

La (Figura 6) muestra la desviación que hay entre las curva teórica (modelada) y la experimental, los autores concluyeron que dicha discrepancia se debe a varios factores como: los autores escogieron zonas donde había una gran fracción de volumen de martensita, pero el material presenta otras zonas donde las bandas de martensita no son tan pronunciadas por lo que esto varía la respuesta ante la deformación, otra causa es que la región que se escogió no es representativa y por lo tanto no muestra la respuesta general del acero, por ultimo, para la simulación se

tomaron valores de comportamiento de material de otros autores y dichos valores no correspondían exactamente al material utilizado en la experimentación[15]. Por lo que el principal aporte de este artículo en el proyecto que se va desarrollar es que se debe tener en cuenta factores micro estructurales presentes en el acero, los cuales si son obviados pueden afectar el la desviación entre el modelo teórico y el modelo experimental con el fin de tener una simulación que se ajuste a las características mecánicas reales del maratíal.

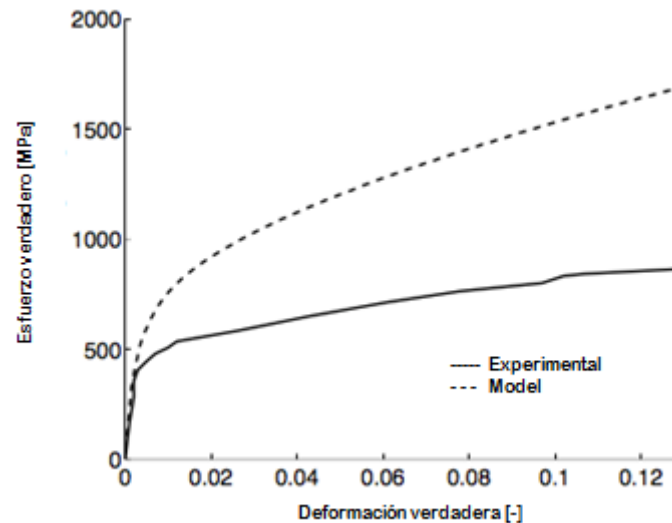


Figura 5. Diagrama esfuerzo-deformación, del modelo teórico y el experimental [15].

- En el año 2015 se realizó una investigación llevada a cabo por (M. JAFARI, S. ZIAEI-RAD, N. SAEIDI, M. JAMSHIDIAN) bajo el título: “Micromechanical analysis of martensite distribution on strain localization in dual phase steels by scanning electron microscopy and crystal plasticity simulation”. En la cual se toma el acero comercial DP 780 como base de estudio y mediante una microscopia electrónica de barrido (SEM) se obtiene la imagen micro estructural luego de esto con un proceso de análisis de imagen se identifican las islas de martensita y con los porcentajes de las fases se modela el diagrama esfuerzo deformación adicionalmente en este estudio se analizaron 3 distribuciones de islas de martensita sobre una matriz ferrítica para determinar los esfuerzos presentes. Como conclusión de esta investigación se obtuvo que la distribución de la martensita en una matriz ferrítica afectan los esfuerzos presentes cuando el material esta sometido a carga y varían de acuerdo a dicha distribución de igual forma esta investigación establece que la interacción entre las dos fases determina el comportamiento desde que se aplica una carga hasta cuando el material falla debido a que las fases de martensita restringen la formación de esfuerzos en la ferrita [16]. Basados en esta información se puede decir que la interacción entre la matriz ferrítica y las islas de martensita es uno de los

factores determinantes de las propiedades mecánicas de los aceros puesto que la distribución de las fases modifica su comportamiento y así mismo las propiedades mecánicas obtenidas en el ensayo de tracción, debido al grado de afectación en las propiedades tanto en el ensayo mecánico como en la simulación del comportamiento del material bajo cargas.

- En el año 2015 se realizó una investigación llevada a cabo por: (NAJMUH. ABIDA, RASHID K. ABU AL-RUB, ANTHONY N. PALAZOTTO) con el título "Micromechanical finite element analysis of the effects of martensite morphology on the overall mechanical behavior of dual phase Steel" en la cual establecen dos estudios sobre la micrografía en el primero toman diferentes micrografías de aceros doble fase en las que se puede determinar que existen una variación significativa en las islas de martensita y mediante la teoría de RVE y un análisis de imagen se establece para cada una de las imágenes micrográficas el tamaño de grano mas común. Como segunda parte del estudio se toma una micrografía con islas de martensita alargadas y se realiza un micromodelamiento por elementos finitos variando el porcentaje del ancho de estas islas en 30, 40, 50 y 60 por ciento del espesor original y sobre estas variaciones se realiza el modelamiento matemático. En conclusión de este estudio se puede establecer que la metodología RVE influye en el modelamiento matemático lo que hace que si no se tiene una selección apropiada del volumen que representa el material se puede llegar a tener valores desviados del comportamiento de la curva en el ensayo de tracción; además de esto los porcentajes y forma de las islas de martensita condicionan el comportamiento global del material y con una forma apropiada de en la distribución de los granos de martensita se puede llegar a mejorar la resistencia mecánica sin sacrificar la ductilidad del material [17]. Para el desarrollo de nuestro proyecto se debe tener en cuenta que la morfología de las islas de martensita puede generar diferentes variaciones en el comportamiento global del acero doble fase (DP) esta característica modifica principalmente la ductilidad y la resistencia mecánica de tal forma que un cambio sustancial en las islas de martensita puede cambiar la resistencia mecánica del material bajo una carga externa.
- En el año 2003 fue desarrollada una investigación por: (AL-ABBASI Y J.A. NEMES) bajo el título de: "Micromechanical modeling of dual phase steels" en la cual los autores en uno de sus apartados desarrollan el modelamiento mecánico aplicando la metodología RVE en un acero DP y parten de la suposición que las fases presentes en la microestructura del acero tiene un comportamiento continuo y periódico lo que quiere decir que si se selecciona una parte de la microestructura que represente las características del material se puede asumir que las celdas contiguas poseen el mismo comportamiento que la parte de la microestructura

seleccionada y de esta forma el comportamiento se hace periódico en toda la microestructura y de igual forma se puede representar el material de estudio. En conclusión los autores de esta investigación con respecto al Volumen Elemental Representativo (RVE) establecen que esta metodología es aplicable a los aceros DP debido a que el comportamiento de las celdas se puede asumir como continuo y periódico (idealización) de esta forma captando el comportamiento global del material [6]. La teoría del volumen elemental representativo (RVE) sostiene que el comportamiento macroscópico o global de un material es representado por la composición microscópica (microestructura) es por esto que para obtener el diagrama esfuerzo-deformación usando micromodelamiento se debe tener en cuenta la respuesta micro estructural cuando es sometido el material a cargas externas.

- En el año 2010 se desarrollo una investigación bajo el nombre: “Micromechanical modeling of ferrite-pearlite steels” la cual fue llevada acabo por: (AL-ABBASI) en la establece que cada fase tiene un comportamiento bilineal que corresponde a un comportamiento elástico y plástico; por lo cual el comportamiento global del material es una relación entre las características de las fases donde la componente de la etapa elásticas esta determinada por la ley de Hooke y el comportamiento plástico esta determinado por la una constante de plasticidad que involucra el esfuerzo equivalente, condición de Von Mises y el esfuerzo plástico. En conclusión del trabajo realizado por Al-Abbasi establece que el micro modelamiento de un acero doble fase se puede simular bajo un análisis bilineal que involucra el comportamiento elástico y plástico. Adicionalmente el comportamiento bilineal de cada fase es una relación que da la característica de las propiedades mecánicas del material. Y por las razones mencionada anteriormente se puede realizar un modelamiento micro mecánico basado en la microestructura [18]. Las propiedades de los material esta relacionado con las características de cada una de sus fases lo que hace que el comportamiento global del material sea una relación de porcentajes entre los micro constituyentes o fases micro estructurales por lo cual en la investigación en curso se debe determinar los porcentajes de cada una de las fases presentes en la micrografía y de esta manera determinar parte del comportamiento global del material.
- En proyecto investigativo “Micromechanical Modeling of Ferrite–Pearlite Steels Using Finite Element Unit Cell Models” desarrollado en el año 2000 por: (NOBUYUKI ISHIKAWA, DAVID M. PARKS, SIMONA SOCRATE Y MASAYOSHI KURIHARA) en el cual desarrollan de forma práctica la obtención de un acero completamente perlítico con una composición eutectoide 0.68%C–0.24%Si–0.87%Mn en porcentajes de masa y lo

sometieron a un ensayo de tensión con el fin de obtener experimentalmente los datos de las propiedades mecánicas de esta fase. Como se mencionó anteriormente hay dos maneras de obtener las características mecánicas de las fases en los aceros para el caso de la ferrita se obtuvieron mediante el valor de la dureza debido a la complejidad para desarrollar un acero compuesto únicamente por ferrita. En conclusión el esfuerzo de tensión es proporcional a la dureza esta metodología de obtención de propiedades mecánicas se debe a la complejidad de desarrollar un material completamente monofásico [19]. Con el fin de conocer las propiedades mecánicas del anterior artículo se puede concluir que principalmente hay dos formas experimentales para determinar las propiedades mecánicas de cada fase, una de ellas es obteniendo un material de una sola fase (cuando es posible) como es el caso de la perlita que sometiendo cierto tipo de acero a un tratamiento térmico se puede obtener un aproximación de un acero monofásico y la segunda forma de obtener esta información es basándose en la dureza de la fase en relación con la composición química de acero.

#### 5.4. Marco legal y normativo

- Norma Técnica Colombiana - NTC 1486 “Documentación, Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación”
- American Society for Testing and Materials - ASTM E08 “Estandart Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials”

### 6. DISEÑO METODOLÓGICO

#### 6.1. Tratamiento térmico al acero SAE 1045

Este tratamiento térmico es necesario para el proyecto ya que en Colombia es difícil conseguir aceros de la serie DP (Dual Phase) ya que esa dicha serie no es comercial a nivel nacional. Por este motivo se compró un acero 1045 normalizado con la siguiente composición química (*Ver Tabla 2*).

Tabla 2. Composición química SAE1045.

%C	%Si	%Mn	%P	%Cr	%Mo	%Ni	%Cu	%N
0.47	0.22	0.65	0.016	0.006	0.52	0.045	0.008	0.006

Esta práctica no contempla diseño experimental ya que no se va a variar ningún parámetro en el tratamiento térmico y solo se realizará uno, que servirá para obtener la microestructura de doble fase para modelar la curva esfuerzo-deformación y realizar sobre el material obtenido el ensayo de tensión.

Para lograr obtener una microestructura de doble fase se realizará un temple a temperatura intercrítica al acero SAE 1045. Es necesario elevar la temperatura del acero hasta llegar a la zona de austenización parcial (Figura 6), comprendida entre  $A_1$  y  $A_3$ , donde hay presencia de austenita y ferrita [20], dicha temperatura se debe mantener por 20 minutos y luego será enfriada en agua para transformar rápidamente la austenita y de esta forma obtener las islas de martensita y finalmente una microestructura que posee una matriz de ferrita con islas de martensita.

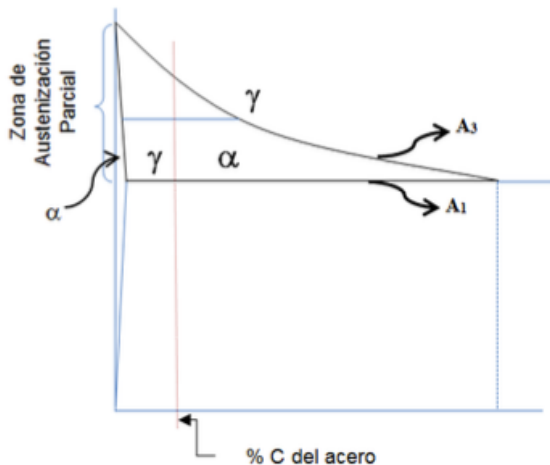


Figura 6. Representación de las zonas y temperaturas de tratamiento [20].

- Temperatura de austenización parcial ( $Ac_1$ ):

$$Ac_1 \text{ } ^\circ\text{C} = 723 - 7.08 \text{ Mn} + 37.7 \text{ Si} + 18.1 \text{ Cr} + 44.2 \text{ Mo} + 8.95 \text{ Ni} + 50.1 \text{ V} \\ + 21.7 \text{ Al} + 3.18 \text{ W} + 297 \text{ S} - 830 \text{ N} - 11.5 \text{ C} \text{ Si} - 14.0 \text{ Mn} \text{ Si} \\ - 3.10 \text{ Si} \text{ Cr} - 57.9 \text{ C} \text{ Mo} - 15.5 \text{ Mn} \text{ Mo} - 5.28 \text{ C} \text{ Ni} \\ - 6.0 \text{ Mn} \text{ Ni} + 6.77 \text{ Si} \text{ Ni} - 0.80 \text{ Cr} \text{ Ni} - 27.4 \text{ C} \text{ V} + 30.8 \text{ Mo} \text{ V} \\ - 0.84 \text{ Cr}^2 - 3.46 \text{ Mo}^2 - 0.46 \text{ Ni}^2 - 28 \text{ V}^2$$

$$Ac_1 \text{ } ^\circ\text{C} = 721,42$$

- Temperatura de austenización total ( $Ac_3$ ):

$$Ac_3 \text{ } ^\circ\text{C} = 912 - 370 \text{ C} + 27.4 \text{ Mn} + 27.3 \text{ Si} - 6.35 \text{ Cr} - 32.7 \text{ Ni} + 95.2 \text{ V} \\ + 190 \text{ Ti} + 72 \text{ Al} - 64.5 \text{ Nb} + 5.57 \text{ W} + 332 \text{ S} + 276 \text{ P} \\ + 485 \text{ N} - 900 \text{ B} + 16.2 \text{ Mn} + 32.3 \text{ C} \text{ Si} + 15.4 \text{ C} \text{ Cr} + 48 \text{ C} \text{ Ni} \\ + 4.32 \text{ Si} \text{ Cr} + 17.3 \text{ Si} \text{ Mo} - 18.6 \text{ Si} \text{ Ni} + 4.8 \text{ Mn} \text{ Ni} + 40.5 \text{ Mo} \text{ V} \\ + 174 \text{ C}^2 + 2.46 \text{ Mn}^2 - 6.86 \text{ Si}^2 + 0.322 \text{ Cr}^2 + 9.9 \text{ Mo}^2 \\ + 1.24 \text{ Ni}^2 - 60.2 \text{ V}^2$$

$$Ac_3 \text{ } ^\circ\text{C} = 783,63$$



Teniendo en cuenta las temperaturas de austenización parcial y total se determina la temperatura del tratamiento térmico que fue de 760°C debido a que se encuentra dentro del rango de temperatura de austenización parcial  $Ac_1$  y temperatura de austenización total  $Ac_3$  y se determina la secuencia de tiempos y temperaturas de la Figura 7.

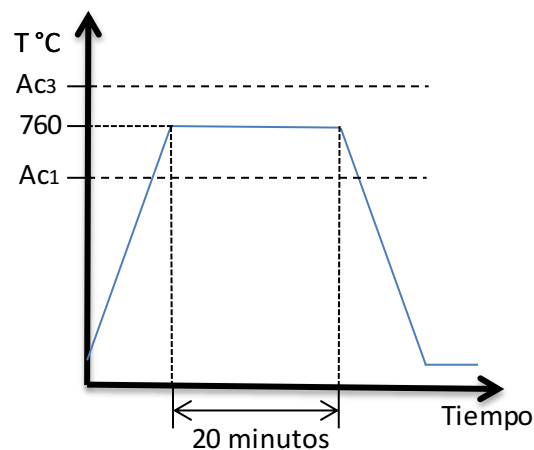


Figura 7. Secuencia de tiempos y temperaturas para el acero SAE1045.

## 6.2. Toma de micrografía

Para tomar la micrografía las probetas deben ser lijadas y luego pasadas por un paño hasta obtener brillo espejo, luego de eso serán atacadas químicamente con ácido nítrico (Nital) durante aproximadamente 5 segundos y luego serán sometidas a un lavado para retirar el Nital, este ataque permitirá distinguir con mayor claridad las fases presentes en el acero.

## 6.3. Elección del volumen elemental representativo

Luego de obtener la imagen estructural binarizada se procede a identificar una zona que presente una periodicidad aproximada a lo largo de la micrografía, es decir una área que pueda representar las características mecánicas a nivel macro del material.

## 6.4. Binarización de imagen microestructural (micrografía)

La micrografía de un acero doble fase es una imagen con diferentes tonalidades que dificultan la detección de las fases presentes en ella, para este proyecto se usa el análisis de imagen en el software Matlab®, mediante la binarización de la matriz de la imagen a color podemos obtener una imagen a blanco y negro donde



se diferencian con mayor claridad las dos fases presentes en la microestructura y lograr calcular el porcentaje que ocupa cada fase en la micrografía.

Numéricamente el color en una imagen está dado por la posición del pixel en una matriz (i, j) y por el dígito que designa dicho tono en la matriz, un pixel puede tomar valores en la matriz desde 0 hasta 16'777.216, entre mayor sea la calidad de la imagen será mayor el valor que puede tomar el pixel.

Matlab® procesa la imagen teniendo en cuenta un umbral que se le asigna para que tome el valor más cercano a la tonalidad que se busca, si el tono es claro lo tomará como blanco y si es oscuro lo tomara como negro. Luego de filtrar los colores genera una matriz binaria de 1 bit por pixel, asignando al color negro el número cero y al blanco el uno.

### **6.5. Asignación de propiedades a los microconstituyentes**

Basados en la matriz binaria de la imagen micro estructural se logra obtener un vector que identifica la posición de cada pixel en la matriz, para posteriormente en un bucle poder asignar las propiedades referentes a cada fase, si en el vector aparece un cero se le asigna el módulo de Poisson y el módulo de elasticidad referente a la martensita y se agrega un lenguaje de programación que sea compatible con la plataforma de ANSYS® para su posterior exportación. Si el numero por el contrario es uno se le asignan las propiedades de la ferrita y se anexa su correspondiente lenguaje de programación.

### **6.6. Simulación de cargas**

Para la simulación hay que tener en cuenta las propiedades mecánicas de los micro constituyentes (Tabla 3) y la malla que usara el software. ANSYS® APDL basa sus análisis en una malla que tiene un tamaño determinado por el usuario, se puede definir este tamaño como la agrupación de varios pixeles, programando manualmente esta acción desde el session editor y de esta manera obtener una malla muy fina que permitirá obtener un detallado análisis micro mecánico.

Tabla 3. Propiedades mecánicas de las fases [15].

	Módulo de Young	Esfuerzo de fluencia
Ferrita	220 GPa	300 MPa
Martensita	195 GPa	1500 MPa

### **6.7. Modelamiento del diagrama esfuerzo deformacion**

Luego de realizar la simulación de cargas, ANSYS® APDL genera un reporte con los esfuerzos y las deformaciones que se presentaron en la microestructura, estos datos se toman y se construye el diagrama esfuerzo-deformación con un modelo bilineal, es decir la zona elástica y plástica serán descritas linealmente, esto para cada una de las fases y de acuerdo con la distribución de las islas de martensita obtener las propiedades globales del material.

### **6.8. Ensayo de tracción.**

El ensayo de tensión será llevado a cabo bajo los estándares de la norma ASTM E8, la cual exige 3 probetas para tener una precisión estadística las cuales deben tener las dimensiones exigidas por la norma y la carga debe ser uniaxial creciente. De este ensayo se obtendrán valores de esfuerzo y deformación, que serán utilizados para construir la curva esfuerzo-deformación experimental del acero SAE 1045.

### **6.9. Comparación de la gráfica esfuerzo-deformacion entre el modelo bilineal simulado y el modelo experimental**

El modelo bilineal simulado se compara con la curva esfuerzo-deformación experimental con el fin de calcular el error que existe entre la simulación y el resultado experimental.

## 6.10. Diagrama de flujo metodológico

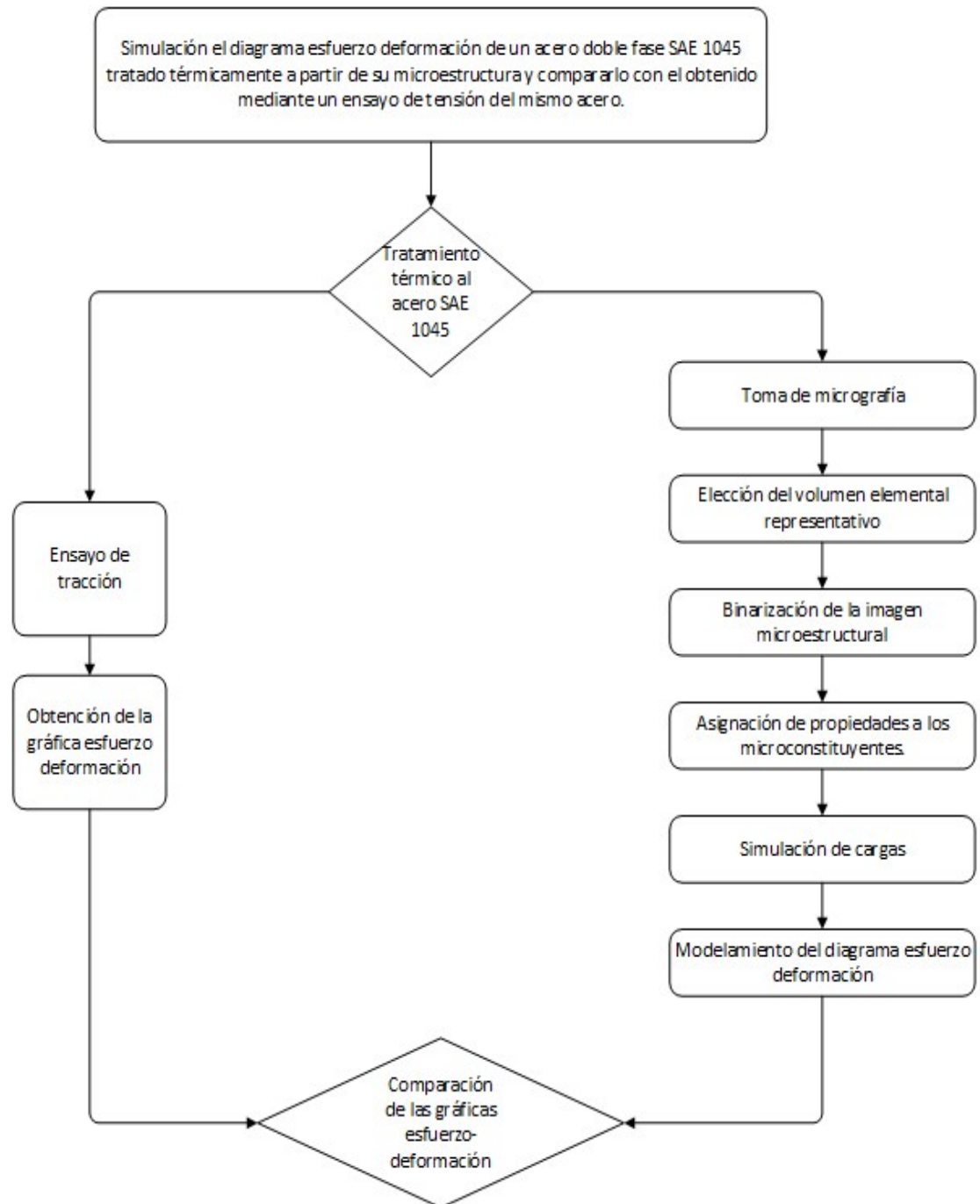


Figura 8. Diagrama de flujo metodológico.

Fuente: Autores del Proyecto, 2017.

## 7. DESARROLLO DEL CÓDIGO

El código desarrollado para completar la simulación del ensayo de tensión fue desarrollado en dos fases; la primera corresponde al análisis y adaptación de la imagen micrográfica y la segunda corresponde a la adaptación del ensayo de tensión en la simulación de cargas. En los siguientes apartados se muestran los principales comandos usados en esta investigación.

### 7.1. Programación Matlab®

El código desarrollado para el análisis de imagen está compuesto de tres fases: lectura de imagen, procesamiento y salida de matriz binaria. Y el código se muestra a continuación junto con su explicación:

```
img=imread('REV#3.jpg');           %Lectura de la imagen
im_g=rgb2gray(img);                %Transformación de la imagen RGB a escala de
                                   %grises
umb=graythresh(img);               %Binarización
bw=im2bw(im_g,umb);                %Transformar la imagen de escala de grises a
                                   %blanco y negro

propied=regionprops(L);            %Identificar rectángulos en la imagen

for n=1:size(propied,1)            %Buscar formas cuadradas en la micrografia

    rectangle('position',propied(n).
    BoundingBox,'EdgeColor','g','LineWidth',2)
End

image_BW=im2bw(img,0,55);          %Modificar umbral y guardar imagen

[r,c]=size(bw);                    %Tamaño de la matriz binaria

I1=fprintf('DO,I,0,%f\n',r);       %Lectura para la creación de áreas en Ansys.
I2=fprintf('DO,I,0,%f\n',c);       %Lectura para la creación de áreas en Ansys.

B=numel(bw(bw==1))                 %Contador de 1 (martensita)
N=numel(bw(bw==0))                 %Contador de 0 (ferrita)

Total=N+B                           %Número de elementos en la matriz

P1=B/Total                           %Porcentaje de martensita en la micrografía
P2=N/Total                           %Porcentaje de ferrita en la micrografía
```

El código completo usado en esta investigación se encuentra en el *Anexo B*.

## 7.2. Programación ANSYS®

Los comandos más relevantes para la simulación de las cargas en ANSYS fueron explicados en la *Tabla 4*, el código completo para la simulación se encuentra en el *Anexo C*.

Tabla 4. Códigos relevantes en la programación de la simulación.

Codigo	Función
*dim,DATF,array,40,1	Creación de matriz de 40x1 para asignación de datos
ET,1,PLANE182	Tipo de elemento, # de elemento, característica del elemento
R,1,10,	Espesor, # de elemento a asignar, valor del espesor
MPDATA,EX,1,,0.220	Matriz, Modulo de elasticidad, # de material, Valor del modulo de elasticidad
MPDATA,PRXY,1,,0.3	Matriz, Modulo de poisson, # de material, Valor del modulo de poisson
*DO,I,0,20	Bucle de creación de un elemento plano de dimensiones 20x19
*DO,J,0,19	
*SET,L,10	
*SET,H,10	
BLC4, L*I,J*H, L,H	
*ENDDO	
FLST,5,304,5,NOOR,101	Selección por clic, Area, # de areas, en desorden
FITEM,5,1	Selección, area, ubicación del area en la matriz
AATT, 2, 1, 1, 0,	Asignación de areas al material 2
NUMMRG,ALL, , , ,LOW	Unificar nodos
NUMMRG,NODE, , , ,LOW	
*SET,PP,JJ*12.5e-6	Asignación de carga
*GET,ESF,PLNSOL,0,MAX	Tomar valores de esfuerzo
*SET,DATA(JJ,1),ESF	Guardar valores de esfuerzo

Fuente: Autores del Proyecto, 2018.

## 8. RESULTADOS

Los resultados de esta investigación se pueden englobar en tres grupos que son; resultados experimentales, resultados del análisis de imagen y los resultados de la simulación, los cuales serán explicados con más detalle en este apartado.

### 8.1. Resultados experimentales

#### 8.1.1. Resultados microestructurales del tratamiento térmico y toma de la micrografía.

La micrografía del material en estado de entrega no corresponde a un acero doble fase, como se muestra en la *Figura 9*, por lo que el material fue sometido a un tratamiento térmico a temperatura intercrítica y se obtuvo satisfactoriamente un acero doble fase; como se evidencia en la *Figura 10*.

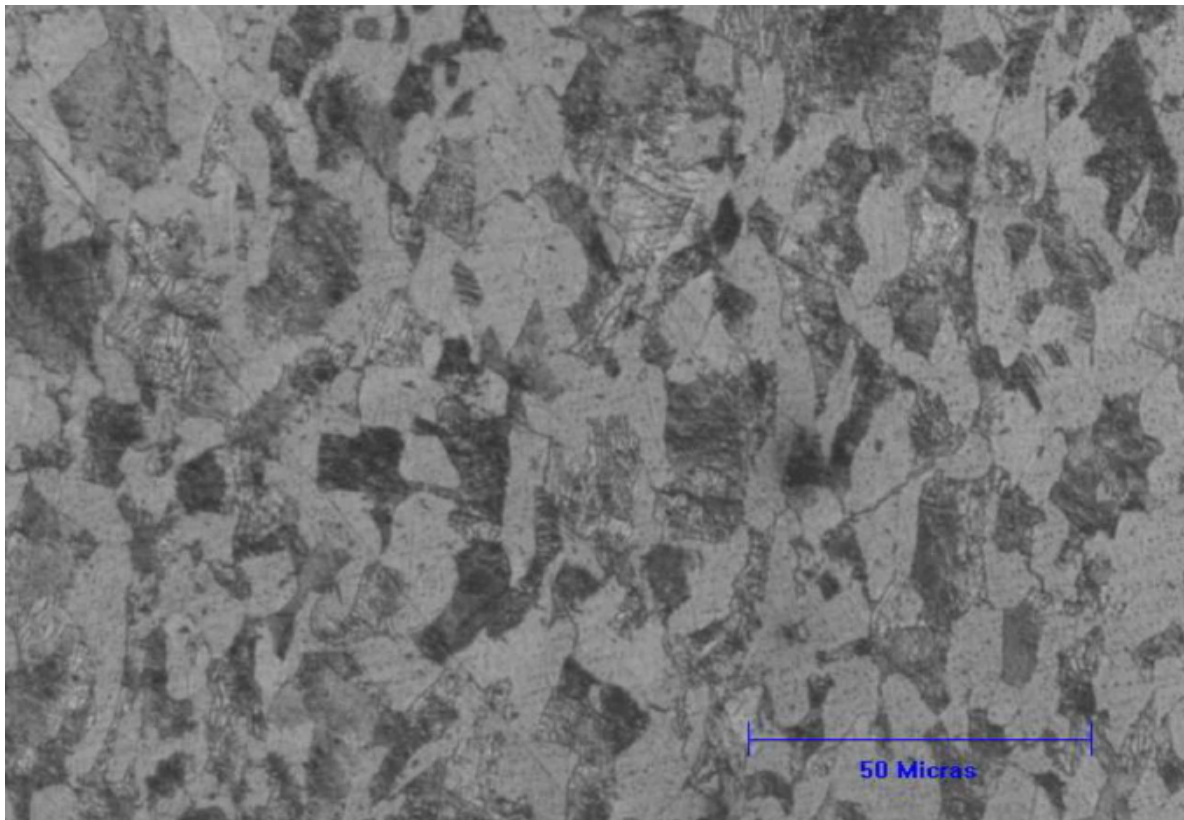


Figura 9. Micrografía del acero en estado de entrega x800 aumentos.[21]

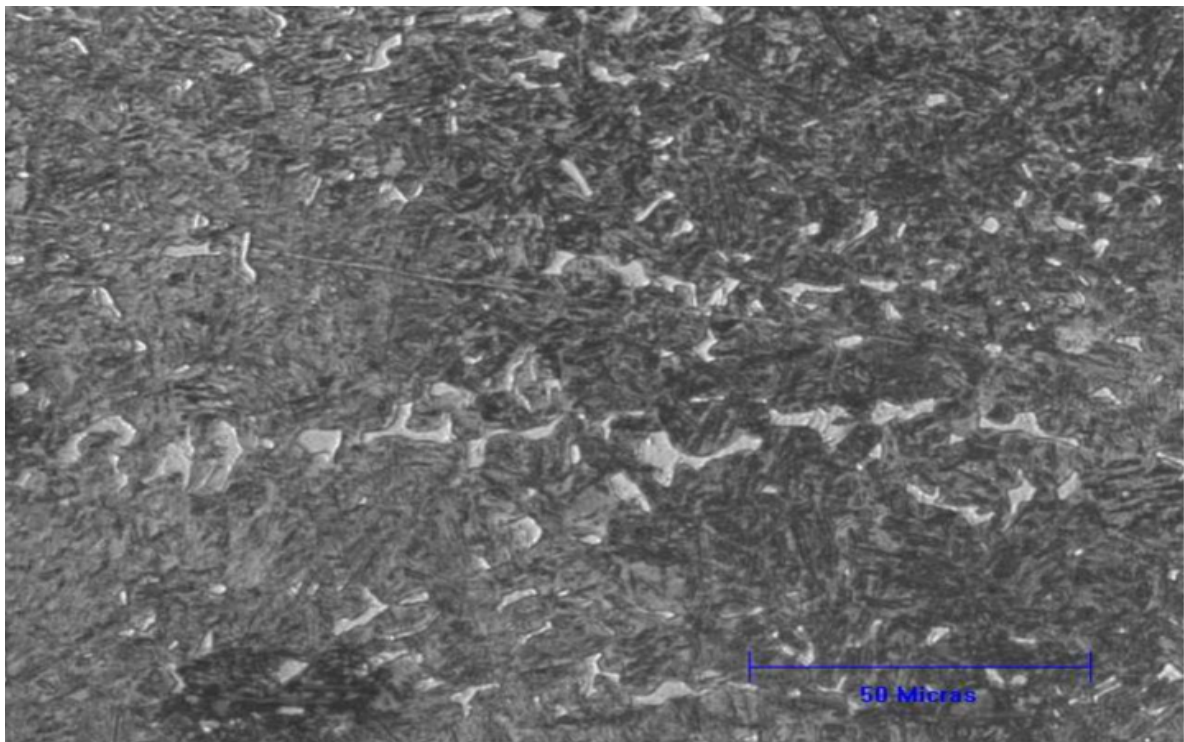


Figura 10. Micrografía acero tratado térmicamente x800 aumentos. [21]

### 8.1.2. Ensayo de tensión

En el ensayo de tensión se adquirieron las características mecánicas del material; lo que corresponde a la referencia donde se quiere llegar con el micro modelamiento matemático. Los resultados de la prueba de tensión fueron realizados bajo los estándares de Norma ASTM E8-00. Estos ensayos se realizaron en material en estado de entrega y en el material tratado térmicamente.



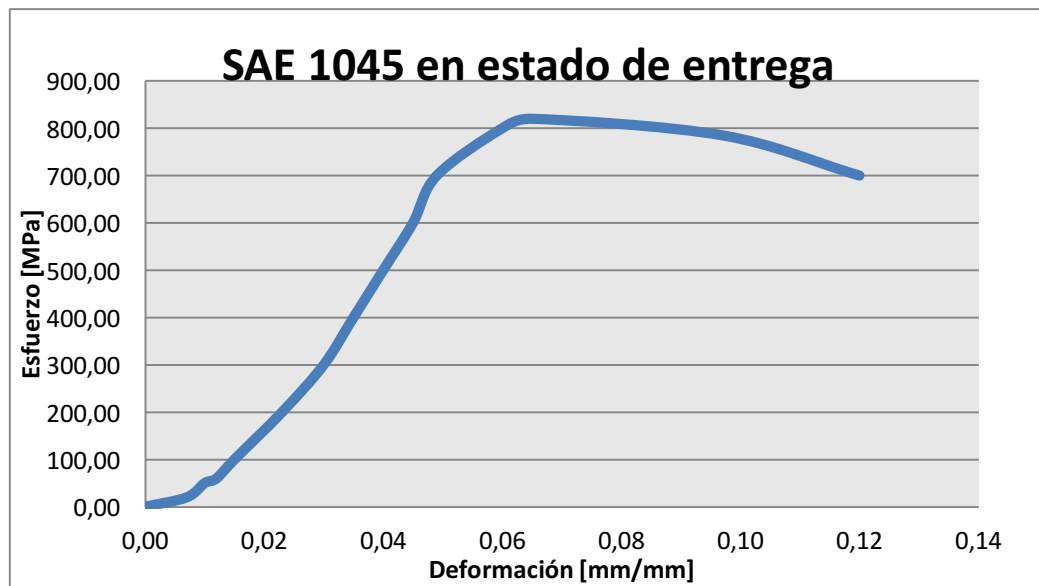


Figura 11. Gráfica esfuerzo deformación del material en estado de entrega.

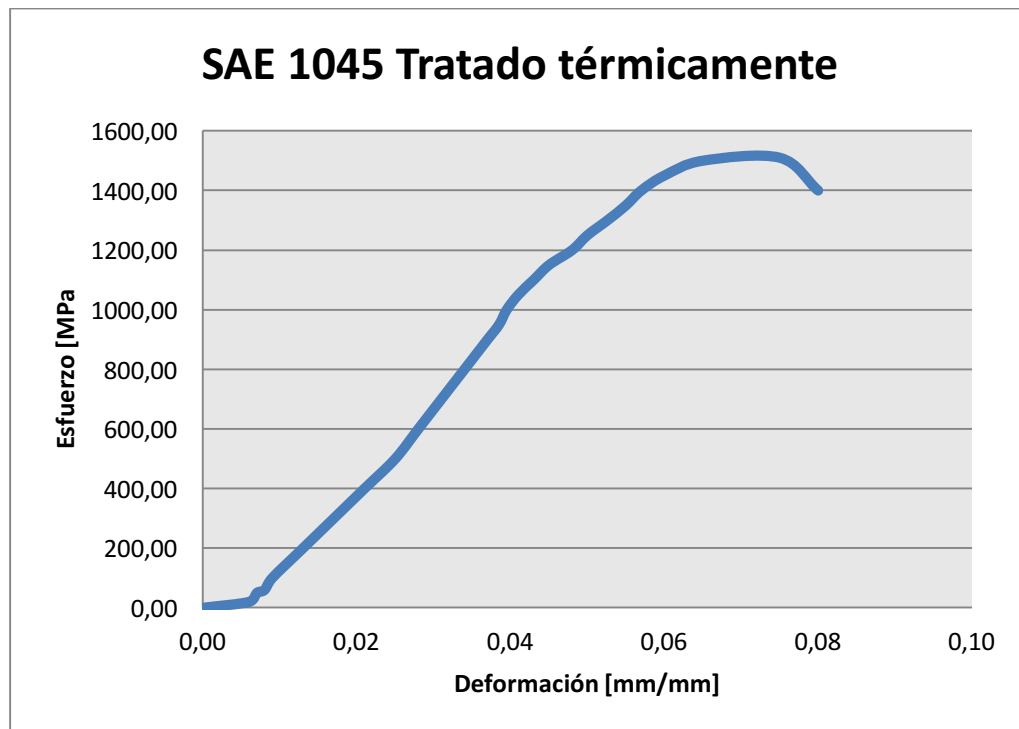


Figura 12. Gráfica esfuerzo deformación material tratado térmicamente.



## 8.2. Resultados de análisis de imagen

### 8.2.1. Elección del volumen elemental representativo.

Siguiendo la metodología expuesta por el profesor Al-Abbasi [7], se seleccionaron tres volúmenes elementales representativos en la micrografía del acero doble fase; estas Volúmenes Elementales Representativos muestran la distribución general y aproximada de toda la micrografía y son expuestos a continuación:

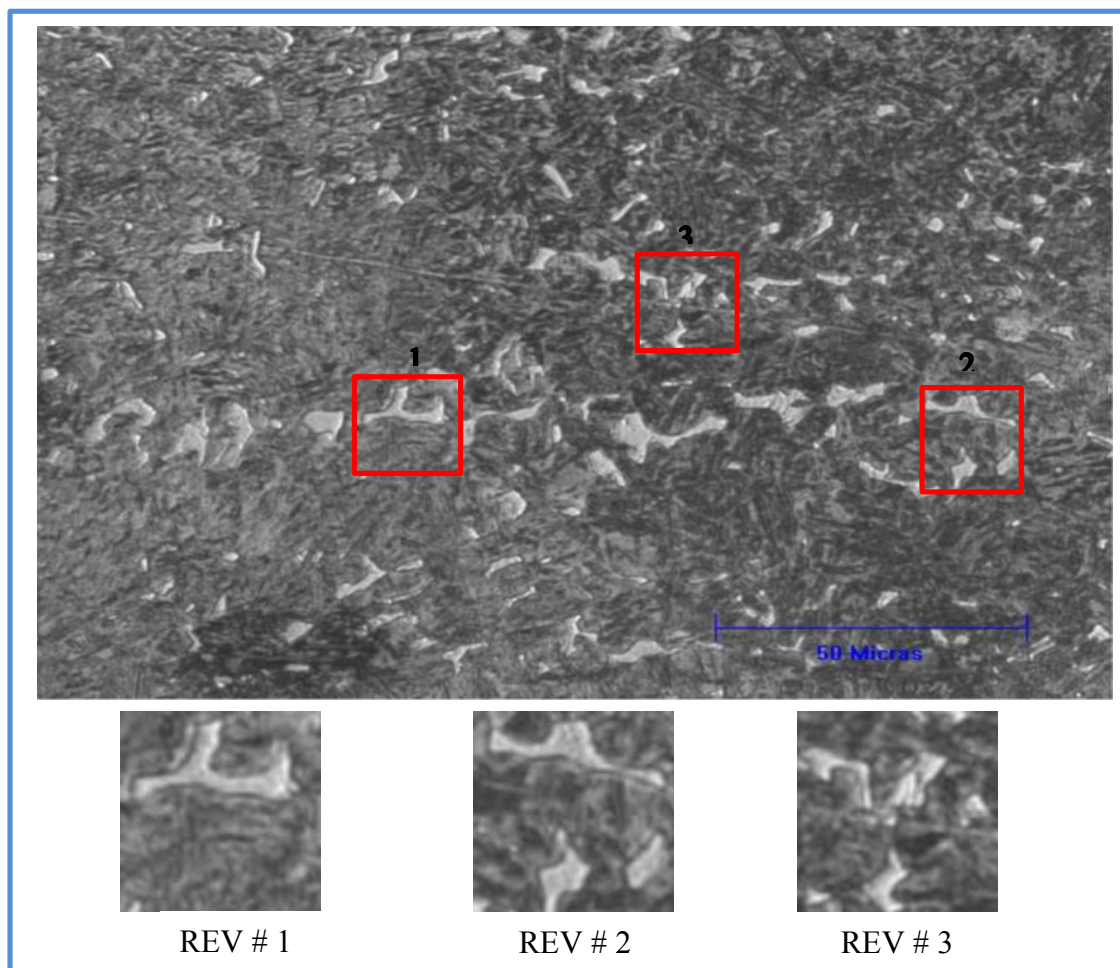


Figura 13. Elección de los RVE's.

### 8.2.2. Binarización de las imágenes RVE

La binarización de la imagen se llevó a cabo sobre las tres imágenes micrográficas RVE (*Figuras 15, 16 y 17*), donde se puede observar el proceso de identificación de las fases y finalmente una imagen en blanco y negro, usando un umbral de 0.55, ya que es el umbral más adecuado y el que mejor se acomoda con la distribución de las fases de la micrografía del acero debido a que representa adecuadamente los porcentajes de las fases como se observa en la figura 14. Podemos observar que a pesar de ser la misma sección de la micrografía, varía dependiendo del umbral que se escoja (*Ver Figura 14*).

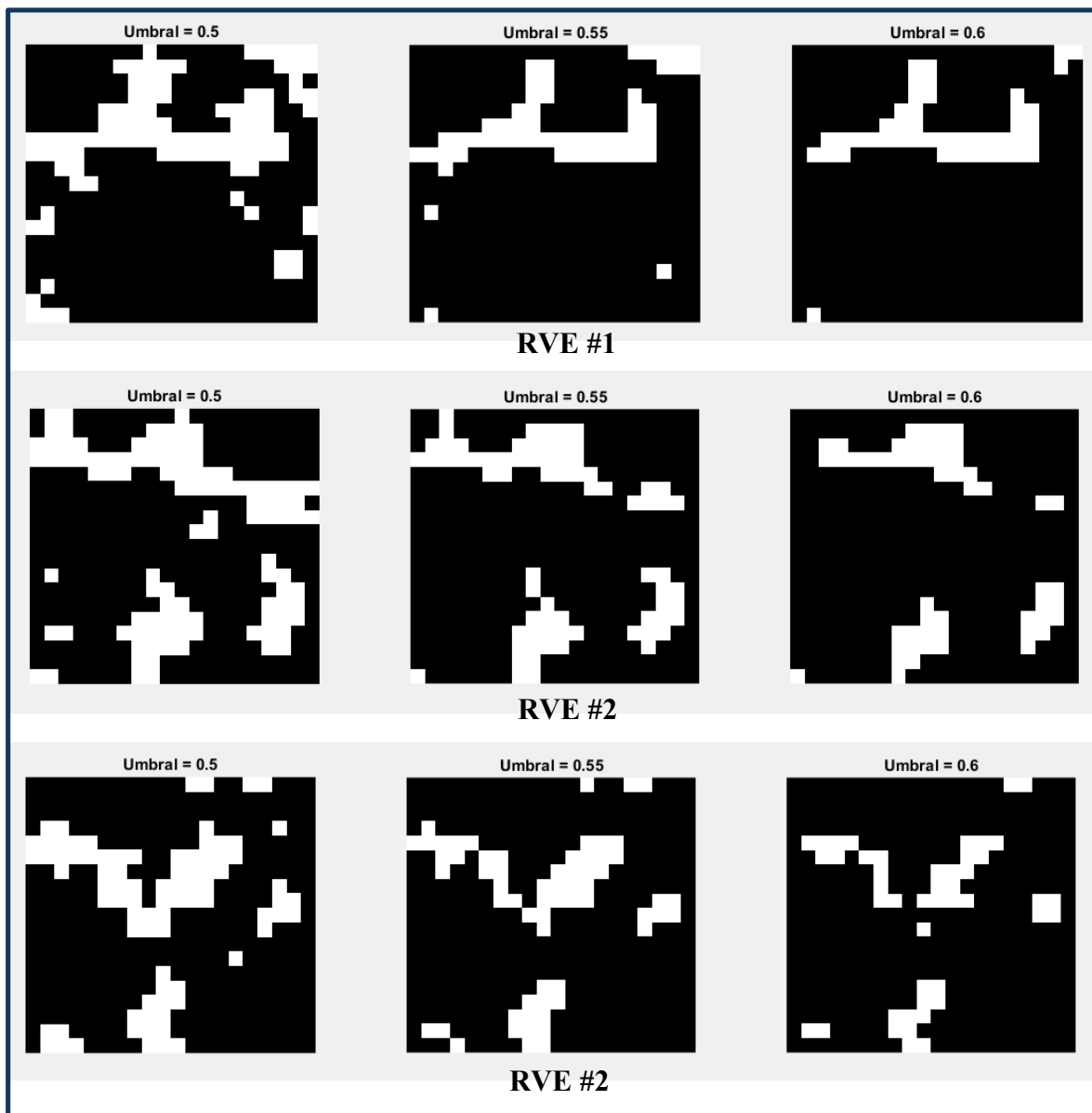


Figura 14. Variación del umbral sobre los diferentes RVE.

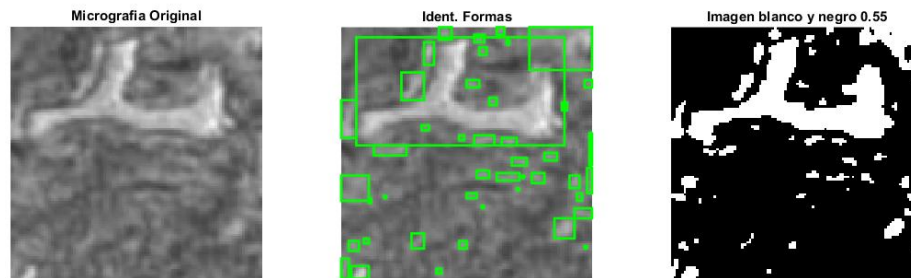


Figura 15. Binarización RVE #1.

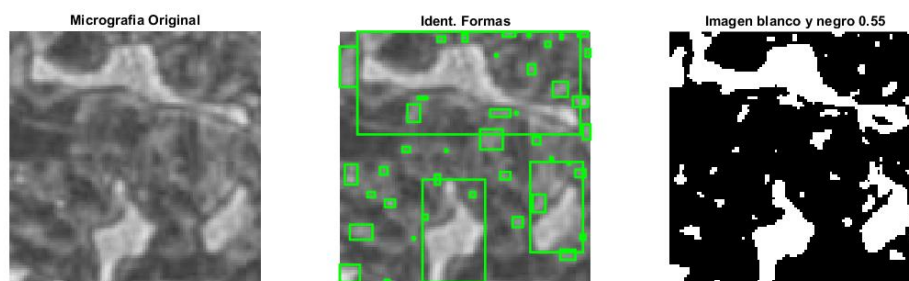


Figura 16. Binarización REV #2.

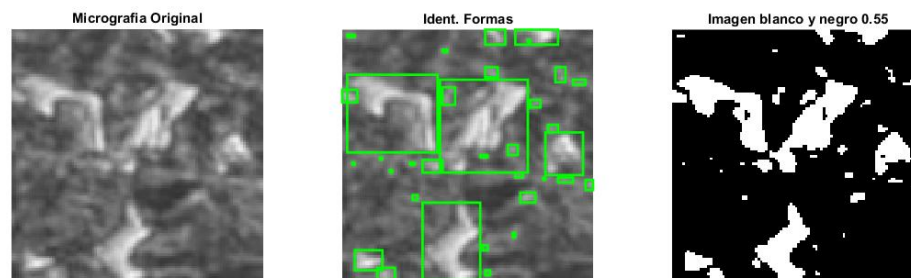


Figura 17. Binarización REV #3.

Partiendo de la imagen en blanco y negro y mediante el uso de Matlab® se generó una matriz binaria donde cada ubicación en la matriz corresponde a un pixel donde; uno es martensita (Blanco) y cero es ferrita (Negro).

### 8.2.3. Porcentaje de fases

Mediante Matlab® se calcula el porcentaje de ambas fases con base en la matriz binaria bajo las siguientes formulas:

$$\%Ferrita = \frac{\sum_0^n \text{número de pixeles negros}}{\text{Número total de pixeles}}$$

$$\%Martensita = \frac{\sum_0^n \text{número de pixeles blancos}}{\text{Número total de pixeles}}$$

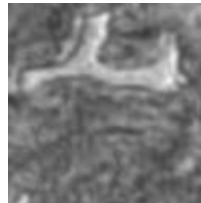


Figura 18. Micrografía RVE #1

El porcentaje de Martensita en la *Figura 18* es de 13.95%, mientras que el 86.05% restante corresponde a ferrita.

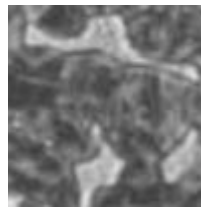


Figura 19. Micrografía RVE #2.

El porcentaje de Martensita en la *Figura 19* es de 24.21%, mientras que el 75.79% restante corresponde a ferrita.

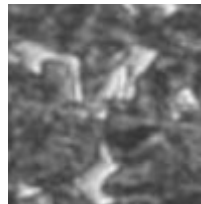


Figura 20. Micrografía RVE #3.

El porcentaje de Martensita en la *Figura 20* es de 17.14%, mientras que el 82.86% restante corresponde a ferrita.

### 8.3. Resultados de la simulación

Estos resultados corresponden a la simulación de las cargas realizadas a los Volúmenes Elementales Representativos. Para la simulación se restringió el eje y de la micrografía mientras que la carga se aplicó perpendicularmente del sentido de la restricción, para asemejar el comportamiento del ensayo de tensión *Figura 21*.

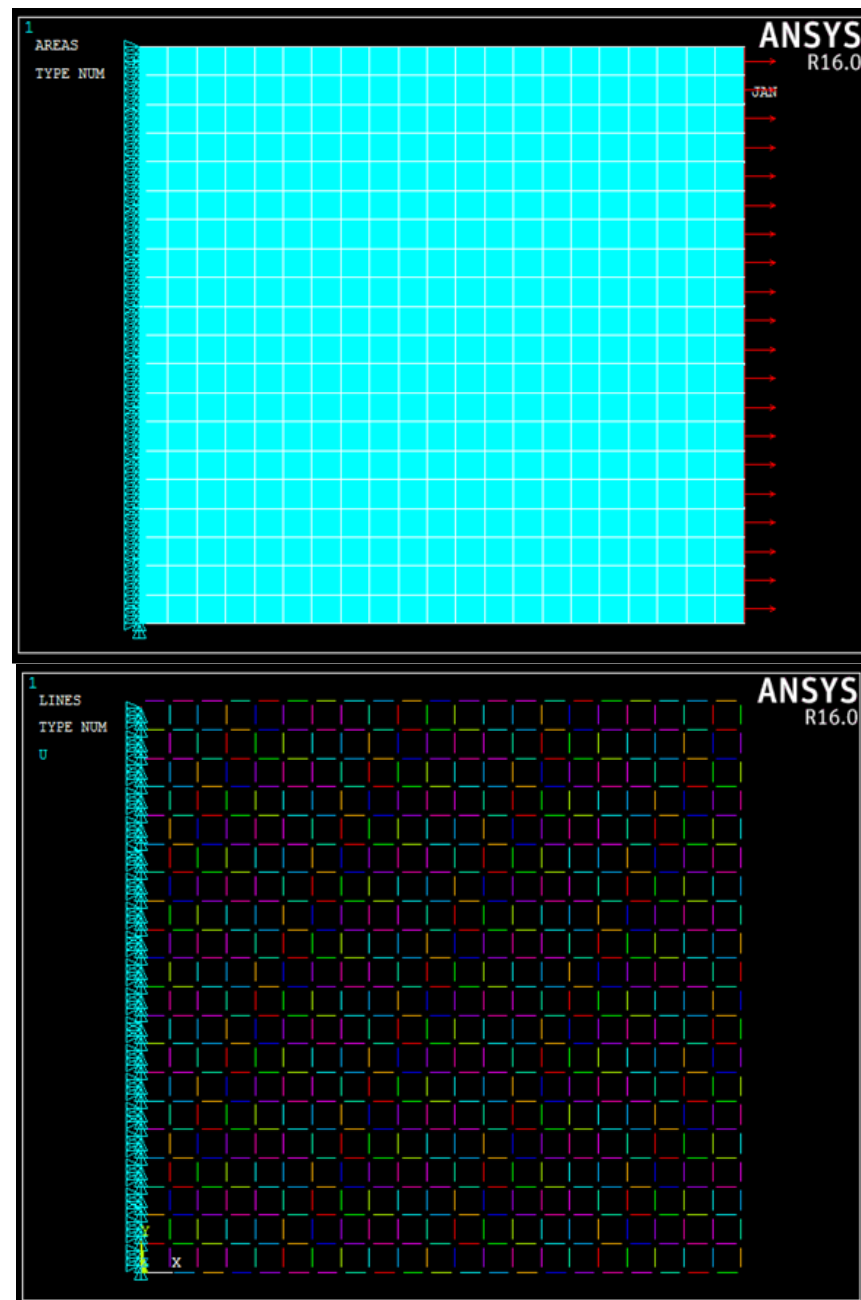


Figura 21. Restricciones y fuerzas usadas en la simulación

### 8.3.1. Resultados RVE

Luego de realizar la simulación de las cargas se obtuvo el siguiente resultado en ANSYS®.

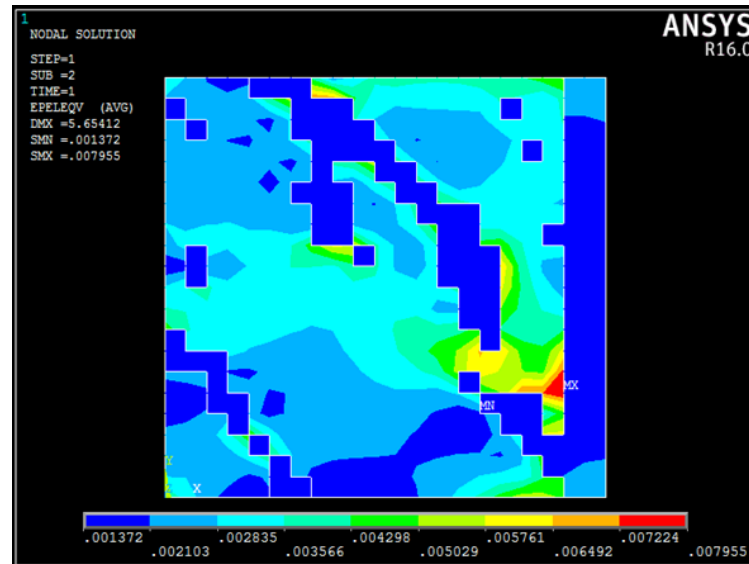


Figura 22. Esfuerzo de Von Mises RVE #1.

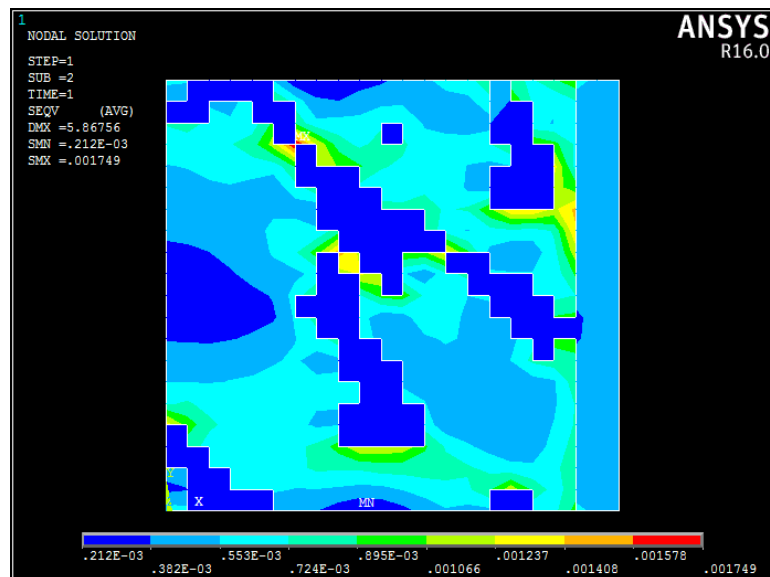


Figura 23. Esfuerzo de Von Mises RVE #2.

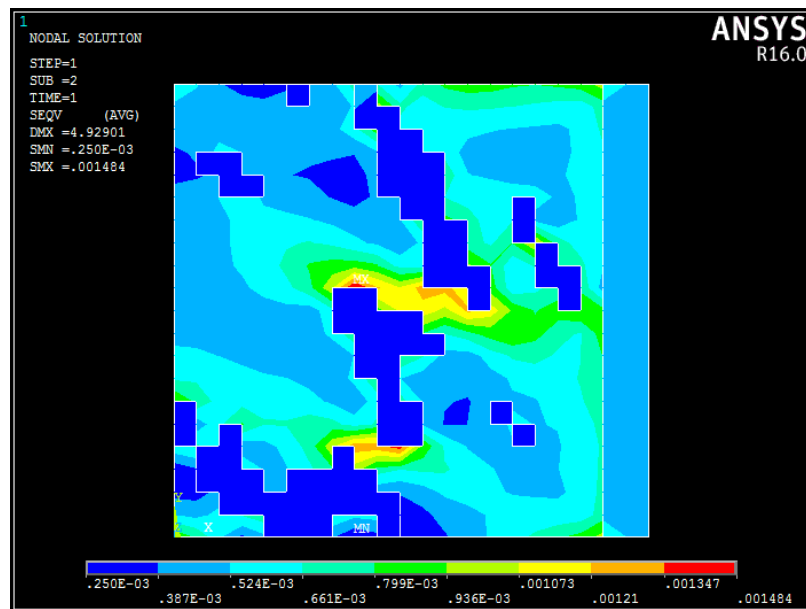


Figura 24. Esfuerzo de Von Mises RVE #3.

La gráfica de los valores de esfuerzo y deformación luego de realizar la simulación se puede observar en las (Figuras 22, 23 y 24), debido a que se trabaja una micrografía, el tamaño de un pixel se encuentra por el orden de micras por ello se tiene que aplicar una carga igualmente pequeña. Por este motivo se tomó el esfuerzo de fluencia real para ajustar la gráfica a los rangos reales del ensayo (Figuras 25, 26 y 27).

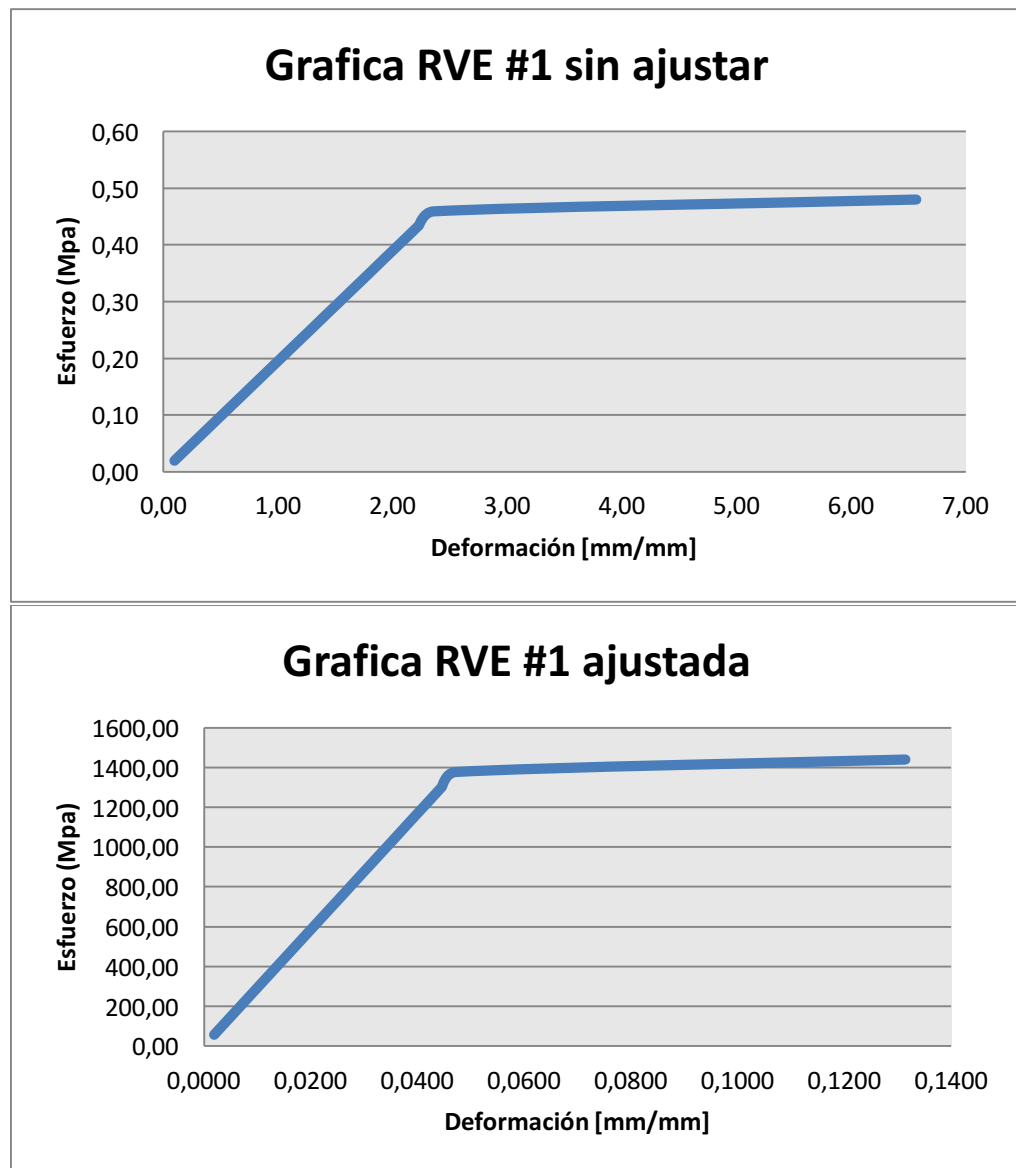


Figura 25. Gráfica sin ajustar escala y gráfica con escala ajustada de RVE #1.



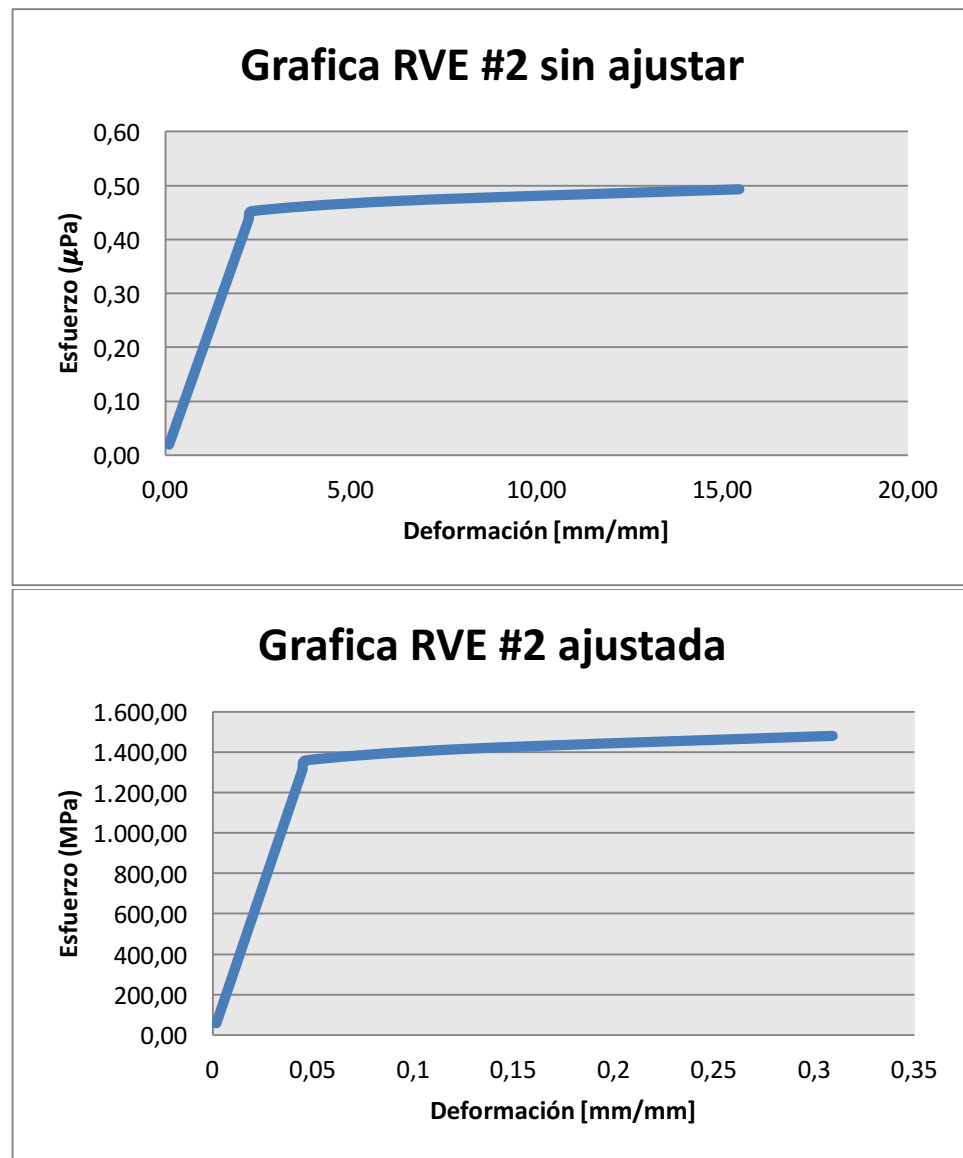


Figura 26. Gráfica sin ajustar escala y gráfica con escala ajustada de RVE #2.

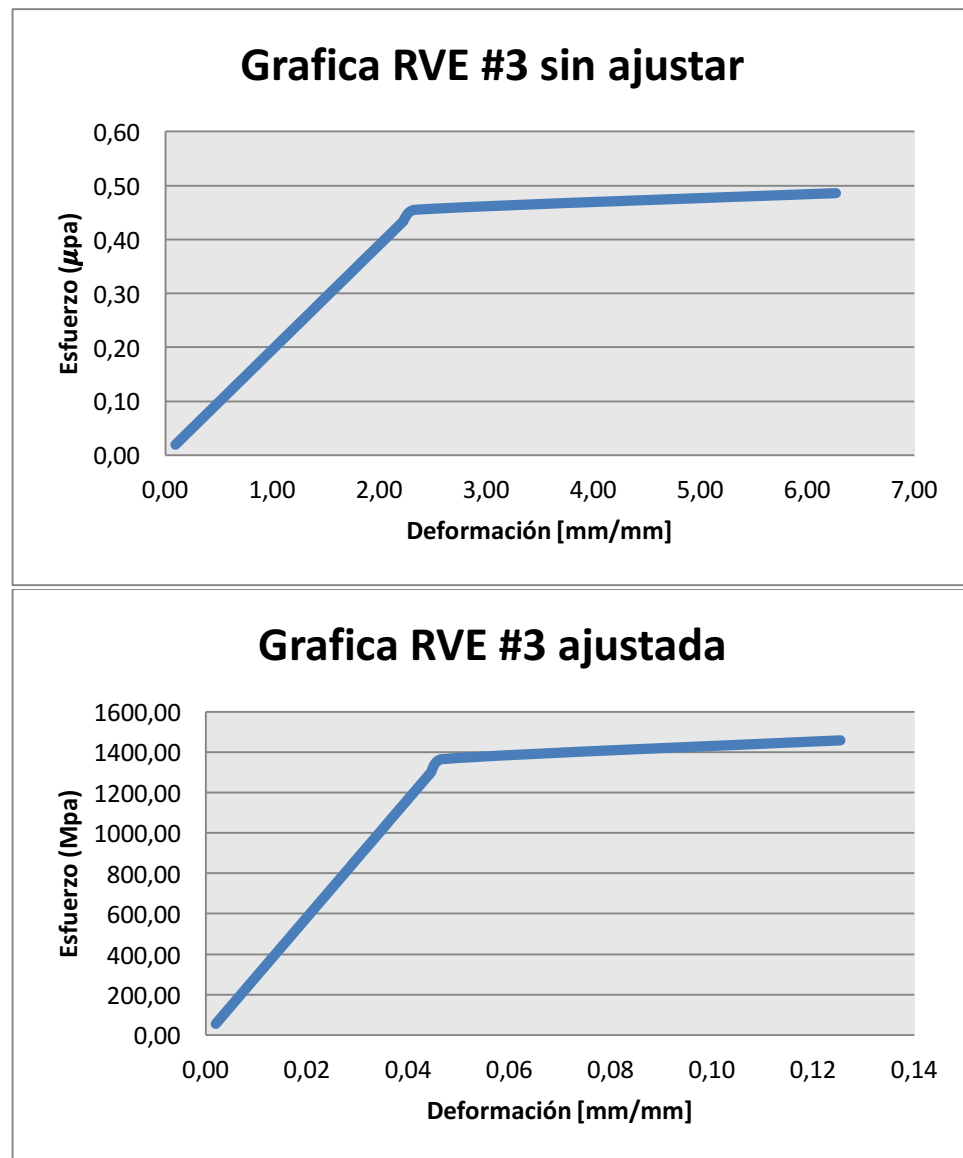


Figura 27. Gráfica sin ajustar escala y gráfica con escala ajustada de RVE #3.

### 8.3.2. Resultados promedio de las simulaciones

Las tres graficas de esfuerzo deformaciones obtenidas por el método de micro modelamiento mecánico con base en las micrografías que fueron seleccionadas por RVE, se promediaron para obtener un comportamiento estadístico de la simulación, como se muestra en la *Figura 29*.

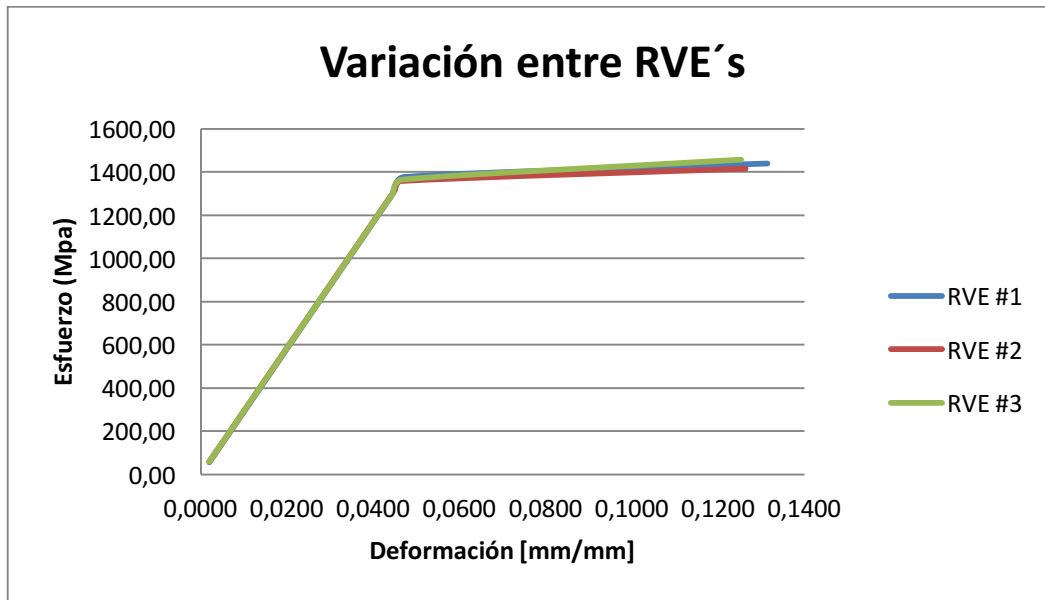


Figura 28. Gráfica comparativa de las gráficas esfuerzo vs deformación de los RVE's

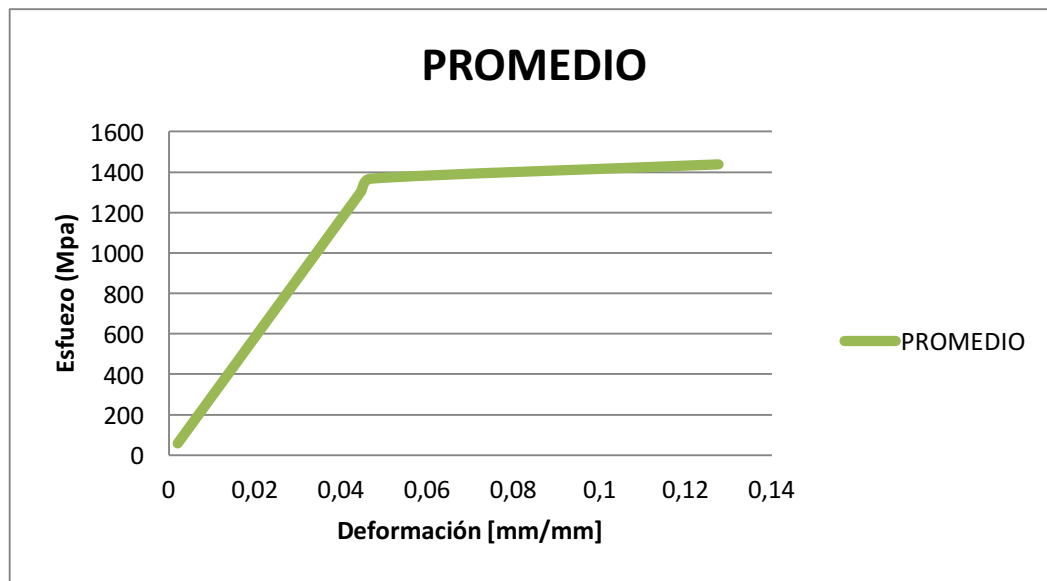


Figura 29. Gráfica con el promedio de las tres gráficas esfuerzo vs deformación.

## 9. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos en esta investigación corresponden principalmente a la comparación del método destructivo (ensayo de tensión) para obtener la curva esfuerzo deformación del acero doble fase y el método de micro modelamiento mecánico (simulación de cargas).

### 9.1. Análisis de resultados experimentales

- De las *Figuras 9 y 10* se puede determinar que el tratamiento térmico a temperatura intercrítica realizado al material SAE 1045, fue realizado satisfactoriamente por lo que se logró obtener la presencia de las dos fases de ferrita y martensita. Basados en la revisión bibliográfica se puede establecer que la matriz observada en la *Figura 10* representa ferrita (color oscuro) y las islas dentro de esta matriz corresponden a la Martensita (color claro).
- Se observa un aumento en las propiedades mecánicas, exactamente en el esfuerzo máximo, el cual paso de un valor de 820 MPa a 1510 MPa; además se evidencia un cambio de pendiente en la zona elástica (*Figura 30*).

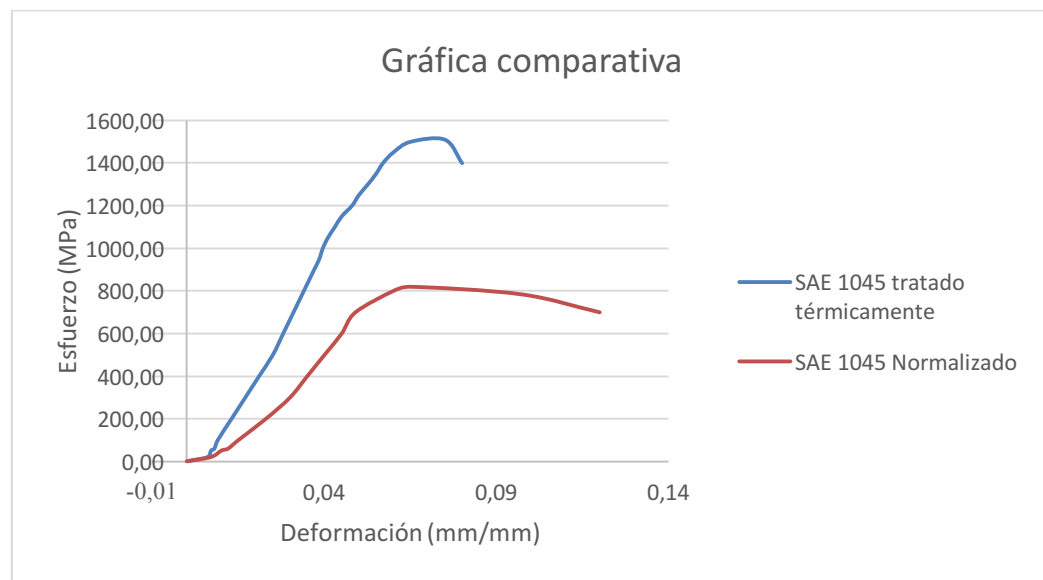


Figura 30. Gráfica comparativa entre el acero SAE 1045 tratado térmicamente y normalizado.

## 9.2. Análisis de resultados de procesamiento de imagen

- Basados en los porcentajes de fases presentes en las selecciones de volúmenes elementales representativos; presentan una dispersión de datos igual a 0,05, valor que se puede evidenciar en la *figura 29*.

Tabla 5. Desviación estándar de los porcentajes de las fases en las selecciones RVE.

# RVE	% MARTENSITA	%FERRITA	DESVIACIÓN ESTANDAR
1	14%	86%	0,05
2	24%	76%	
3	17%	83%	

Fuente: Autores del Proyecto, 2018.

- En la *Tabla 6* se puede evidenciar que si se varía drásticamente el umbral se afecta proporcionalmente la distribución porcentual de las fases.

Tabla 6. Variación del umbral en el REV #2

REV # 2		
Umbral	%Ferrita	%Martensita
0	0%	100%
0.55	24%	76%
1	100%	0%

Fuente: Autores del Proyecto, 2018.

- Analizando la información obtenida en la *tabla 6* se puede identificar que la matriz de ferrita corresponde al digito 1 en la matriz binaria y por el contrario las islas de martensita son identificadas por el código 0.

## 9.3. Análisis de resultados de la simulación de cargas.

- En las *Figuras 22, 23 y 24* se puede observar que las islas de martensita presentan menor esfuerzo en comparación que la matriz ferrítica cuando la micrografía fue expuesta a la carga. Lo que muestra que la simulación está acorde con la teoría puesto que la martensita es la fase que tiene mayor contenido de carbono en la microestructura lo que la hace más resistente a la tracción.
- En las *Figuras 25, 26 y 27* se evidencia que al escalar el esfuerzo y la deformación, no se afecta la pendiente ni el comportamiento de la curva. Por tanto los resultados de la simulación mantienen el comportamiento bilineal proporcionado a la escala.

- La pendiente en la zona elástica de la curva simulada y la curva real son el parámetro para ajustar la simulación al comportamiento experimental del material, lo que conlleva determinar la pendiente de la zona elástica como parámetro de ajuste.
- El modelo bilineal tiende a infinito debido a que dentro de la simulación no se contempla el punto de falla del material lo que indica que si se generan más iteraciones se seguirá deformando el material y no muestra la fractura.
- En la Figura 31 se evidencia la misma pendiente en la zona elástica tanto para la curva real como para la simulada; esto debido a la parametrización de la curva simulada que tuvo en cuenta el valor de la pendiente y el esfuerzo máximo del material real.

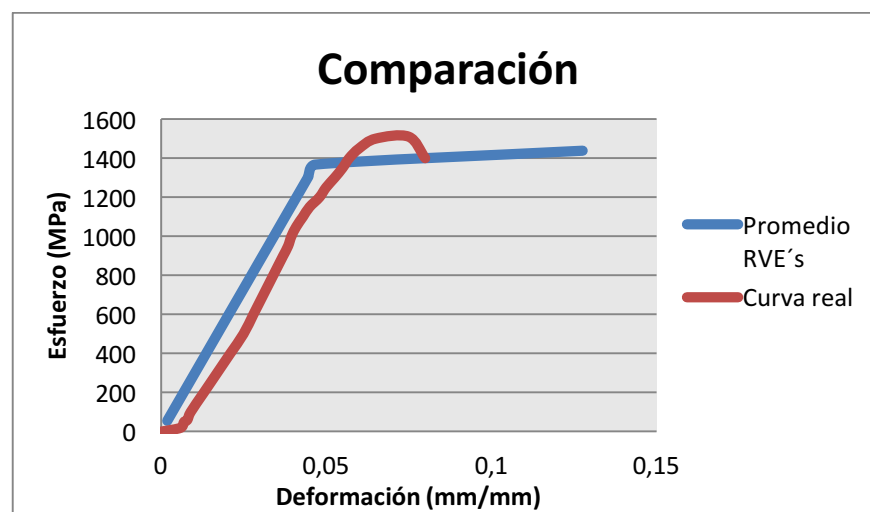


Figura 31. Comparación entre la curva simulada y la real

- Si la carga a la cual se expone la micrografía es muy alta, la simulación dará como resultado una deformación plástica elevada ya que la simulación no tiene en cuenta el punto de fractura del material por ello la deformación para el programa será tan grande como se aplique la carga *Figura 32*.

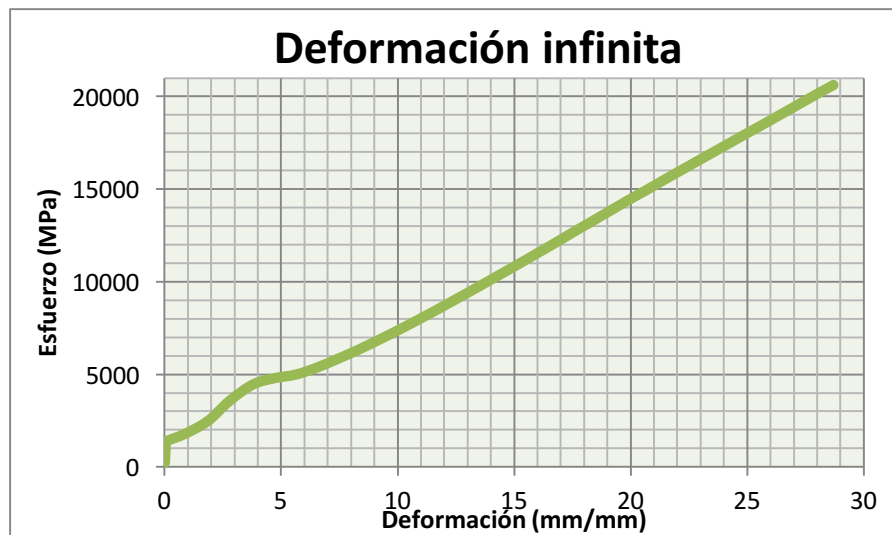


Figura 32. Deformación plástica infinita en la simulación.



## 10. CONCLUSIONES

- Se concluye que el método de Al-Abbasi para la selección del volumen elemental representativo se puede extrapolar a la micrografía en general, lo que quiere decir que aunque en primera instancia la micrografía se considera como una distribución heterogénea de fases, puede llegar a ser modelada como homogénea con la ayuda del micro modelamiento mecánico de volúmenes representativos, que reducen la variabilidad de las fases y presentan una menor dispersión (*Tabla 5*).
- El umbral escogido para el procesamiento de la imagen es importante debido a que puede variar considerablemente el porcentaje de presencia de las fases; entre más cercano sea cero mayor será el porcentaje de martensita y viceversa (*Tabla 6*).
- El resultado de la simulación de cargas en ANSYS muestra esfuerzos y deformaciones del orden de  $\mu\text{Pa}$  debido a que el modelamiento basa su cálculo en el área de los pixeles, en relación a esto se calcula el aumento en la carga por cada iteración y se hace necesario escalar los resultados a valores reales en MPa para lograr una correcta comparación entre la simulación y la curva esfuerzo deformación experimental.
- La variación entre las curva esfuerzo-deformación real y la simulada, se presenta porque los módulos de elasticidad de la ferrita y la martensita pueden variar ya que para este trabajos se tomaron valores de la literatura consultada. También puede verse afectada por el método de escalar la curva simulada.
- Los parámetros de esfuerzo máximo y pendiente de la zona elástica permitieron ajustar el comportamiento de la simulación; teniendo en cuenta que son parámetros que influyen drásticamente en el comportamiento del material.
- En el análisis de imagen se puede remplazar la identificación de los pixeles para que se generen formas con contornos curvos , en lugar de formas rectangulares para identificar las fases.
- Para lograr una mejor aproximación a la curva experimental se recomienda para futuras investigaciones la utilización de un modelo multilineal.

## 11. RECOMENDACIONES

- Los rangos de la gráfica simulada se encuentran en el orden de las micras debido a que se está simulando una carga en la micrografía del acero, se recomienda realizar este ajuste parametrizando los rangos de la simulación y de esta manera obtener la gráfica con los vales de esfuerzo y deformación comparables con los de la curva real.
- Los valores del módulo de Young para la ferita y la martensita *Ver tabla 3* se tomaron de un estudio realizado a un acero DP900. Para lograr una simulación más exacta y cercana a la curva real se deben tomar los valores reales para el acero que se le realizara la simulación ya que a pesar que ambos aceros son doble fase los valores de módulo de Young pueden variar entre los dos especímenes.
- La parametrización de la simulación requiere un estudio profundo con el fin de lograr ajustar las curva arrojada por la simulación al comportamiento del material en el ensayo de tensión, debido a que para este estudio el principal parámetro fue el esfuerzo máximo y la pendiente de la curva experimental.
- Para futuros estudios basados en esta investigación, se debe identificar la variación en las propiedades de las fases, lo que quiere decir que, se debe establecer si los módulos de elasticidad de las fases afectan la simulación cuando se varían en magnitud.

## REFERENCIAS

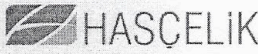
- [1] Zhou, J., Gokhale, A., Gurumurthy, A., & Bhat, S. (2015). Relistic microestructural RVE- based simulations of stress-strain behavior of a dual phase steel having high martensite volume fraction. *ELSEVIER, materials science & engineering* , 9.
- [2] Amirmaleki, M., Samei, J., Green, D., Van Reimsdijk, I., & Steward, L. (2016). 3D micromechanical modeling of dual phase steels using the representative volume element method. *ELSEVIER, Mechanics of Materials* , 27-39.
- [3] Fonstein, N. (2016). Dual phase steels. En N. Fonstein, *Automotive Steels* (págs. 169-216). Chicago: WoodHead Publishing.
- [4] Schröder, J., Gandhi, A., & Daniel, B. (2014). Two- scale modeling of DP steel incorporating distributed properties inside micro-constituents. *ELSEVIER, Science Direct* , 6.
- [5] Abid, N., Abu Al-Rub, R., & Palazotto, A. (2016). Micromechanical finite element analysis of the effects of martensite morphology on the overall mechanical behavior of dual phase steel. *ELSEVIER, International Journal of Solids and Structures* , 8-24.
- [6] Al-Abbasi, F., & Nemes, J. (2003). Micromechanical modeling of dual phase steels. *International Journal of Mechanical Sciences* , 17.
- [7] Chen, W.-F., & Han, D.-J. (1988). *Plasticity for Structural Engineers*. New York: J. Ross Publishing.
- [8] Rodriguez, M., Ilardent, A., Gonzalez, A., & Garcia, A. (2010). *Fundamentos de resistencia de materiales*. Universidad Nacional de Educación a Distancia.
- [9] Beer, F., Johnston, E., & DeWolf, J. (2010). *Mecánica de materiales (5a. ed.)*. McGraw-Hill Interamericana.
- [10] Gonzalez Viña, W., & Mancini, H. (2003). *Ciencia de los materiales*. Editorial Ariel.
- [11] William F., S., & Hashemi, J. (2006). *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales (4a. ed.)*. McGraw-Hill Interamericana.
- [12] Al-Abbasi, F., & Nemes, J. (2007). Characterizing DP-steels using micromechanical modeling of cells. *ELSEVIER* , 14.
- [13] Ebrahimian, A., & Ghasemi Banadkouki, S. (2016). Effect of alloying element partitioning on ferrite hardening in a low alloy ferrite-martensite dual phase steel. *ELSEVIER* , 9.
- [14] de la Concepcion, V., Lorusso, H., & Svoboda, H. (2013). Effect of carbon content on microstructure and mechanical properties of dual phase steels. *ELSERVIER* , 10.
- [15] Schellekens, M., Coenen, E., & Kouznetsova, V. (2010). *Microstructural modelling of dual phase steel*.
- [16] Jafari, M., Ziaei-Rad, S., Saeidi, N., & Jamshidian, M. (2016). Micromechanical analysis of martensite distribution on strain localization in

dual phase steels by scanning electron microscopy and crystal plasticity simulation. *ELSEVIER, Materials Science and Engineering* , 10.

- [17] Abid, N. H., Abu Al-Rub, R. K., & Palazotto, A. N. (2017). Micromechanical finite element analysis of the effects of martensite morphology on the overall mechanical behavior of dual phase steel. *ELSEVIER* , 17.
- [18] Al-Abbasi, F. (2010). Micromechanical modeling of ferrite-pearlite steels. *ELSEVIER* , 13.
- [19] ISHIKAWA, N., PARKS, D., SOCRATE, S., & KURIHARA, M. (2000). Micromechanical Modeling of Ferrite–Pearlite Steels Using Finite Element Unit Cell Models. En M. I. Technology, *ISIJ International* (Vol. 40, págs. 1170–1179). Massachusetts: Department of Mechanical Engineering,.
- [20] Bohórquez, C. A. (2012). *Influencia del tratamiento térmico desde temperaturas lintercríticas en las propiedades mecánicas del acero SAE 1045*. Salta, Argentina: Asociación Argentina de mecanica computacional.
- [21] CÁRDENAS, A., & GONZALEZ, P. (2016). Influencia del temple desde temperaturas intercriticas y revenido a temperatura de 350° c con diferentes tiempos en las propiedades mecánicas tensión - impacto de un acero SAE 1045. *Universidad Libre*, 61.


## ANEXOS

### Anexo A: certificado de composición química del acero



**HASÇELİK SANAYİ VE TİCARET A.Ş.**  
**KALİTE BELGESİ / MILL TEST CERTIFICATE**

EN 10204 3.1



ISO/TS 16949  
ISO 9001/2008  
ISO 14001  
OHSAS 18001

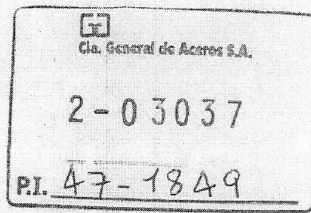
Müşteri Adı / Customer Name :	COMPANIA GENERAL DE ACEROS SA	Tarih / Date Of Issue :	29.12.2016
Ürün Adı / Product Name :	COLD DRAWN ROUND BAR	Kesit / Size(mm) :	019.05X000.00
Stok Adı / Stock Code :	Y019.05X000.00 HPR(AISI 1045)A 00 C0/EN 10278 h9/SC P1	Kalite / Grade :	AISI 1045
İrsaliye No / Waybill No :	-	Döküm No / Heat No :	51605694
Standart / Material Norm :	EN 10278 h9	Ağırlık / Net-Gross Weight (Kgs) :	3350
Sipariş No / Order No :			
Evrak No / Certificate No :	2016-12-1109	Çelik Yapım Metodu / Steel Making Method :	Elektrik Ark Ocağı/Electric Arc Furnace

**KİMYASAL KOMPOZİSYON / CHEMICAL COMPOSITION IN PRODUCT**

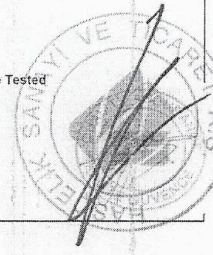
C%	Si%	Mn%	P%	S%	Cr%	Mo%	Ni%	Cu%	Al%	N%	Pb%	V%	Ti%	B%	Sn%
0.47	0.22	0.65	0.016	0.006	0.052	0.005	0.045	0.008	-	0.006	-	-	-	-	-

**MEKANİK ÖZELLİKLER / MECHANICAL PROPERTIES**

Akma N/mm <sup>2</sup> Yield	Çekme N/mm <sup>2</sup> Tensile	Uzama (%) Elongation (%)	Sertlik HB Hardness
678	851	10.2	243



<p>Görsel Muayene : Uygun</p> <p>Vakum Durumu: (A) Vakumlu</p> <p>Yüzey Çatlak Testi: Test Yapılmadı</p> <p>Ultrasonik Test: Test Yapılmadı</p> <p>Parlak Malzeme Yüzey Çatlak Testi: Test Yapılmadı</p> <p>Radyoaktivite: Yoktur</p>	<p>Visual Control : OK</p> <p>Vacuum Condition: Vacuum Degassed</p> <p>Surface Crack Test: None Tested</p> <p>Ultrasonic Test : None Tested</p> <p>Surface Crack Test Of Bright Products: None Tested</p> <p>Radioactivity Free</p>
---	---



Bu belge yukarıda tanımlanan malzeme için valid imzalı olarak düzenlenmiştir. Çoğaltılma koruyucu güvencesi HASÇELİK Sorumludur. Malzemelerin test edildiği ve raporları şartlarına uygun olduğu onaylanır. Kuşku durumunda geçerli belge olarak HASÇELİK tek kaynağa bağlanmalıdır. Bu malzeme AT900-4400 Çizeli ile %100 radyoaktif testten geçirilmiş hammadde ile üretilmiştir. HASÇELİK San. ve Tic. A.Ş. Vakumlu/UT Kontrolü/Yüzey Çatlak Kontrolü/Tamamlanmış ürünler kimyasal kompozisyon garantisi ile birlikte tedarikçilerin HASÇELİK'e verdiği garanti kapsamında garanti şartlarını müşterilerine sunmaktadır. Vakumsuz/Vakumlu ürünler için kimyasal kompozisyon dışında herhangi bir garanti verilmemektedir. Okunabilirliği herhangi bir tatile sonucunda HASÇELİK sadece malzeme bedeli iade eder. Garanti şartları dışında malzemelerde veya sonradan prosedürlerle ortaya çıkan olumsuz durumlarda boy kesilme/ışık/ışık/ışık malzemenin teknikleri olarak iade alınması dışında HASÇELİK San. ve Tic. A.Ş. herhangi bir konuda yükümlü tutulamaz.

This certificate is issued originally signed for the material described above. HASÇELİK does not take any responsibility for the non-authorized copies. We hereby confirm that above mentioned material has been tested and the results meet the order requirements. In case of doubt, the original copy at HASÇELİK should be consulted as authoritative test. This material is produced from 100% radioactive tested raw material with AT900-4400. HASÇELİK San. ve Tic. A.Ş. presents to its customers chemical composition and guarantee conditions of its suppliers for vacuum degassed / U.T. Controlled/Processed products. Vacuum degassed/Non-vacuum degassed products are not guaranteed except for chemical composition. Chemical composition guarantee is given for Heat and Processed products. HASÇELİK is responsible for only the value of materials in case of any quality problem which will occur. For any unfavorable out of guarantee condition arising in customers or during follow up processes HASÇELİK is not responsible for any other issue than accepting technical and commercial restitutions of uncut/unprocessed materials.

www.hascelik.com T: +90 444 4140 F: +90 444 5140





## Anexo B:Codigo de Matlab

```
clear all
clc
img=imread('REV#3.jpg'); %ingresa la imagen
im_g=rgb2gray(img); %escala de grises
umb=graythresh(img);%binarizacion
bw=im2bw(im_g,umb);
[L Ne]=bwlabel(bw);

figure(1)
subplot(1,3,1)
imshow(img),title(sprintf('Micrografia Original'));

figure(1)
subplot(1,3,2)
imshow(img),title(sprintf('Ident. Formas'));

propied=regionprops(L);
hold on
for n=1:size(propied,1)
    rectangle('position',propied(n).BoundingBox,'EdgeColor','g','LineWidth',2)
end

image_BW=im2bw(img,0);
subplot(1,3,3)
imshow(bw),title(sprintf('Imagen blanco y negro 0.55'));

[r,c]=size(bw);
l1=fprintf('DO,l,0,%f\n',r);
l2=fprintf('DO,l,0,%f\n',c);
l1,l2
%x=length(bw)

B=numel(bw(bw==1))%contador de 1
N=numel(bw(bw==0))%contador de 0

Total=N+B%numero de elementos de la matriz
P1=B/Total%porcentaje de color blanco en la micrografia
P2=N/Total%porcentaje de color negro en la micrografia

figure;
imshow(bw);
%M1=12345;
%M2=67890;

x=[image_BW(:)];

pos1=find(x==1);
T=zeros(size(x));
for i=1:length(x);
    if x(i)==1
        T(i)=fprintf(1,'FITEM,5,%0.0f\n',i);
    end
end
end
```

## Anexo C:Codigo de Ansys

```

/NOPR ! Suppress printing of UNDO process
/PMACRO ! Echo following commands to log
FINISH ! Make sure we are at BEGIN level
/CLEAR,NOSTART ! Clear model since no
SAVE found
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
*dim,DATA,array,40,1
*dmatrix,DATA,d,,40,1
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
*dim,DATF,array,40,1
*dmatrix,DATF,d,,40,1
*DO,JJ,0,40
/input,menust,tmp,"
/GRA,POWER
/GST,ON
/PLO,INFO,3
/GRO,CURL,ON
/CPLANE,1
/REPLOT,RESIZE
WPSTYLE,,,,,,,,,0
/REP7
!*
ET,1,PLANE182
!*
KEYOPT,1,1,0
KEYOPT,1,3,3
KEYOPT,1,6,0
!*
!*
R,1,10,
!*
ACLEAR,1,1000
ADELE,1,1000
LCLEAR,1,4000
LDELE,1,4000
KCLEAR,1,4000
KDELE,1,4000
!*
!!!!!!Propiedades de la ferrita !!!!!!!
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
!!!!!!MPDATA,EX,1,,187000
MPDATA,EX,1,,0.220
MPDATA,PRXY,1,,0.3
TB,BISO,1,
!*
TBDE,BISO,1,,,
TB,BISO,1,1,2,
TBTEMP,0
!!!!!!TBDATA,,380,1000,,,,
TBDATA,,3.0e-4,0.001541,,,,
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!Propiedades de la Martensita
MPTEMP,,,,,,,,

```

```

MPTEMP,1,0
!!!!!!MPDATA,EX,2,,230000
MPDATA,EX,2,,0.195
MPDATA,PRXY,2,,0.3
TB,BISO,2,
!*
TBDE,BISO,2,,,
TB,BISO,2,1,2,
TBTEMP,0
!!!!!!TBDATA,,1800,1000,,,,
TBDATA,,0.001500,0.02875,,,,
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
Inicio del Loop
*DO,I,0,20
*DO,J,0,19
*SET,L,10
*SET,H,10
BLC4, L*I,J*H, L,H
*ENDDO
*ENDDO
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
/REPLOT,RESIZE
/REPLOT,RESIZE
/REPLOT,RESIZE
ASEL,ALL
/AUTO,1
/REP,FAST
APLOT
ASEL,ALL
/REPLOT,RESIZE
FLST,5,304,5,NOOR,101
FITEM,5,1
FITEM,5,2
FITEM,5,3
FITEM,5,4
FITEM,5,7
FITEM,5,8
FITEM,5,9
FITEM,5,10
FITEM,5,11
FITEM,5,12
FITEM,5,13
FITEM,5,14
FITEM,5,15
FITEM,5,16
FITEM,5,17
FITEM,5,18
FITEM,5,19
FITEM,5,20
FITEM,5,21
FITEM,5,22
FITEM,5,25
FITEM,5,26

```

FITEM,5,27  
FITEM,5,28  
FITEM,5,29  
FITEM,5,30  
FITEM,5,31  
FITEM,5,32  
FITEM,5,33  
FITEM,5,34  
FITEM,5,35  
FITEM,5,36  
FITEM,5,38  
FITEM,5,39  
FITEM,5,40  
FITEM,5,41  
FITEM,5,46  
FITEM,5,47  
FITEM,5,48  
FITEM,5,49  
FITEM,5,50  
FITEM,5,51  
FITEM,5,52  
FITEM,5,53  
FITEM,5,54  
FITEM,5,55  
FITEM,5,58  
FITEM,5,59  
FITEM,5,60  
FITEM,5,61  
FITEM,5,64  
FITEM,5,65  
FITEM,5,66  
FITEM,5,67  
FITEM,5,68  
FITEM,5,69  
FITEM,5,70  
FITEM,5,71  
FITEM,5,72  
FITEM,5,73  
FITEM,5,74  
FITEM,5,75  
FITEM,5,77  
FITEM,5,78  
FITEM,5,79  
FITEM,5,80  
FITEM,5,83  
FITEM,5,84  
FITEM,5,85  
FITEM,5,86  
FITEM,5,87  
FITEM,5,88  
FITEM,5,89  
FITEM,5,90  
FITEM,5,91  
FITEM,5,92  
FITEM,5,93  
FITEM,5,94

FITEM,5,95  
FITEM,5,96  
FITEM,5,97  
FITEM,5,98  
FITEM,5,99  
FITEM,5,100  
FITEM,5,104  
FITEM,5,105  
FITEM,5,106  
FITEM,5,107  
FITEM,5,108  
FITEM,5,109  
FITEM,5,110  
FITEM,5,111  
FITEM,5,112  
FITEM,5,113  
FITEM,5,114  
FITEM,5,115  
FITEM,5,116  
FITEM,5,117  
FITEM,5,118  
FITEM,5,119  
FITEM,5,124  
FITEM,5,125  
FITEM,5,126  
FITEM,5,127  
FITEM,5,128  
FITEM,5,129  
FITEM,5,130  
FITEM,5,131  
FITEM,5,132  
FITEM,5,133  
FITEM,5,134  
FITEM,5,135  
FITEM,5,136  
FITEM,5,137  
FITEM,5,138  
FITEM,5,139  
FITEM,5,140  
FITEM,5,141  
FITEM,5,145  
FITEM,5,146  
FITEM,5,147  
FITEM,5,148  
FITEM,5,149  
FITEM,5,152  
FITEM,5,153  
FITEM,5,154  
FITEM,5,155  
FITEM,5,156  
FITEM,5,157  
FITEM,5,158  
FITEM,5,159  
FITEM,5,160  
FITEM,5,161  
FITEM,5,164



FITEM,5,165  
FITEM,5,166  
FITEM,5,167  
FITEM,5,172  
FITEM,5,173  
FITEM,5,174  
FITEM,5,175  
FITEM,5,176  
FITEM,5,177  
FITEM,5,178  
FITEM,5,183  
FITEM,5,184  
FITEM,5,191  
FITEM,5,192  
FITEM,5,193  
FITEM,5,194  
FITEM,5,195  
FITEM,5,200  
FITEM,5,201  
FITEM,5,202  
FITEM,5,203  
FITEM,5,204  
FITEM,5,207  
FITEM,5,208  
FITEM,5,211  
FITEM,5,212  
FITEM,5,213  
FITEM,5,214  
FITEM,5,219  
FITEM,5,220  
FITEM,5,221  
FITEM,5,222  
FITEM,5,223  
FITEM,5,224  
FITEM,5,225  
FITEM,5,226  
FITEM,5,227  
FITEM,5,228  
FITEM,5,230  
FITEM,5,231  
FITEM,5,238  
FITEM,5,239  
FITEM,5,240  
FITEM,5,241  
FITEM,5,242  
FITEM,5,243  
FITEM,5,244  
FITEM,5,245  
FITEM,5,246  
FITEM,5,247  
FITEM,5,248  
FITEM,5,249  
FITEM,5,250  
FITEM,5,251  
FITEM,5,255  
FITEM,5,256

FITEM,5,257  
FITEM,5,258  
FITEM,5,259  
FITEM,5,260  
FITEM,5,261  
FITEM,5,262  
FITEM,5,263  
FITEM,5,264  
FITEM,5,265  
FITEM,5,266  
FITEM,5,267  
FITEM,5,268  
FITEM,5,269  
FITEM,5,270  
FITEM,5,273  
FITEM,5,274  
FITEM,5,275  
FITEM,5,276  
FITEM,5,277  
FITEM,5,278  
FITEM,5,279  
FITEM,5,280  
FITEM,5,281  
FITEM,5,282  
FITEM,5,283  
FITEM,5,284  
FITEM,5,285  
FITEM,5,287  
FITEM,5,288  
FITEM,5,289  
FITEM,5,290  
FITEM,5,291  
FITEM,5,292  
FITEM,5,293  
FITEM,5,294  
FITEM,5,295  
FITEM,5,296  
FITEM,5,297  
FITEM,5,298  
FITEM,5,299  
FITEM,5,300  
FITEM,5,301  
FITEM,5,302  
FITEM,5,303  
FITEM,5,304  
FITEM,5,306  
FITEM,5,307  
FITEM,5,308  
FITEM,5,309  
FITEM,5,310  
FITEM,5,311  
FITEM,5,312  
FITEM,5,313  
FITEM,5,316  
FITEM,5,317  
FITEM,5,318



FITEM,5,319  
FITEM,5,320  
FITEM,5,321  
FITEM,5,322  
FITEM,5,323  
FITEM,5,324  
FITEM,5,325  
FITEM,5,326  
FITEM,5,327  
FITEM,5,328  
FITEM,5,329  
FITEM,5,330  
FITEM,5,331  
FITEM,5,334  
FITEM,5,335  
FITEM,5,336  
FITEM,5,337  
FITEM,5,338  
FITEM,5,339  
FITEM,5,340  
FITEM,5,341  
FITEM,5,342  
FITEM,5,343  
FITEM,5,344  
FITEM,5,345  
FITEM,5,346  
FITEM,5,347  
FITEM,5,348  
FITEM,5,379  
FITEM,5,380  
CM,\_Y,AREA  
ASEL, , , P51X  
CM,\_Y1,AREA  
CMSEL,S,\_Y  
!\*  
CMSEL,S,\_Y1  
AATT, 2, 1, 1, 0,  
CMSEL,S,\_Y  
CMDELE,\_Y  
CMDELE,\_Y1  
!\*  
ASEL,ALL  
FLST,5,420,5,ORDE,2  
FITEM,5,1  
FITEM,5,-420  
ASEL,S, , , P51X  
!\*  
!\*  
LESIZE,ALL, , , 1, , 1, , , 1,  
!\*  
!\*  
MSHAPE,0,2D  
MSHKEY,0  
!\*  
FLST,5,420,5,ORDE,2  
FITEM,5,1

FITEM,5,349  
FITEM,5,350  
FITEM,5,353  
FITEM,5,354  
FITEM,5,355  
FITEM,5,356  
FITEM,5,357  
FITEM,5,358  
FITEM,5,359  
FITEM,5,360  
FITEM,5,361  
FITEM,5,362  
FITEM,5,363  
FITEM,5,364  
FITEM,5,365  
FITEM,5,366  
FITEM,5,367  
FITEM,5,368  
FITEM,5,369  
FITEM,5,370  
FITEM,5,371  
FITEM,5,372  
FITEM,5,373  
FITEM,5,374  
FITEM,5,375  
FITEM,5,376  
FITEM,5,377  
FITEM,5,378  
FITEM,5,-420  
CM,\_Y,AREA  
ASEL, , , , P51X  
CM,\_Y1,AREA  
CHKMSH,'AREA'  
CMSEL,S,\_Y  
!\*  
AMESH,\_Y1  
!\*  
CMDELE,\_Y  
CMDELE,\_Y1  
CMDELE,\_Y2  
!\*  
!\*  
!\*  
NUMMRG,ALL, , , , LOW  
NUMMRG,NODE, , , , LOW  
FLST,5,420,5,ORDE,2  
FITEM,5,1  
FITEM,5,-420  
CM,\_Y,AREA  
ASEL, , , , P51X  
CM,\_Y1,AREA  
CHKMSH,'AREA'  
CMSEL,S,\_Y  
!\*  
FLST,2,20,4,ORDE,20  
FITEM,2,4



```
FITEM,2,8
FITEM,2,12
FITEM,2,16
FITEM,2,20
FITEM,2,24
FITEM,2,28
FITEM,2,32
FITEM,2,36
FITEM,2,40
FITEM,2,44
FITEM,2,48
FITEM,2,52
FITEM,2,56
FITEM,2,60
FITEM,2,64
FITEM,2,68
FITEM,2,72
FITEM,2,76
FITEM,2,80
!*
/GO
DL,P51X, ,ALL,
FLST,2,20,4,ORDE,20
FITEM,2,1602
FITEM,2,1606
FITEM,2,1610
FITEM,2,1614
FITEM,2,1618
FITEM,2,1622
FITEM,2,1626
FITEM,2,1630
FITEM,2,1634
FITEM,2,1638
FITEM,2,1642
FITEM,2,1646
FITEM,2,1650
FITEM,2,1654
FITEM,2,1658
FITEM,2,1662
FITEM,2,1666
FITEM,2,1670
FITEM,2,1674
FITEM,2,1678
/GO
!*
```

```
*SET,PP,JJ*12.5e-6
SFL,P51X,PRES,-PP,
FINISH
/SOL
/STATUS,SOLU
SOLVE
FINISH
/POST1
!*
PLNSOL, S,EQV, 0,1.0
*GET,ESF,PLNSOL,0,MAX
*SET,DATA(JJ,1),ESF
/EFACET,1
PLNSOL, EPTO,EQV, 0,1.0
*GET,DEF,PLNSOL,0,MAX
*SET,DATF(JJ,1),DEF
FINISH
*ENDDO
/POST1
!*
/EFACET,1
PLNSOL, EPPL,EQV, 0,1.0
*PRINT,DATA,DATA.txt
*PRINT,DATF,DATF.txt
printing after UNDO process
!*VPLOT,DATA, , , , , , , ,
!*
/DSCALE,ALL,OFF
/EFACET,1
PLNSOL, S,EQV, 0,1.0
FINISH
/REP7
FINISH
/POST1
!*
/REPLOT,RESIZE
/DIST,1,1.08222638492,1
/REP,FAST
/DIST,1,0.924021086472,1
/REP,FAST
/REPLOT,RESIZE
/REPLOT,RESIZE
)/GOP ! Resume printing after UNDO
process
)! We suggest a save at this point
```